

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DIONEI CONGER

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA POROSIDADE VIA SIMULAÇÃO  
NUMÉRICA PARA PRODUTOS INJETADOS EM ALÚMINIO SOB PRESSÃO

CURITIBA

2016

DIONEI CONGER

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA POROSIDADE VIA SIMULAÇÃO NUMÉRICA  
PARA PRODUTOS INJETADOS EM ALÚMINIO SOB PRESSÃO

Tese apresentada como requisito para obter o título de Doutor em Engenharia Mecânica do curso de doutorado em engenharia mecânica da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes.

CURITIBA

2016

---

C744e

Concer, Dionei

Estudo do comportamento da porosidade via simulação numérica para produtos injetados em alumínio sob pressão / Dionei Concer. – Curitiba, 2016.

128 f. : il. color. ; 30 cm.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes .

Bibliografia: p. 104-108.

1. Alumínio – Metalurgia. 2. Porosidade. I. Universidade Federal do Paraná. II. Marcondes, Paulo Victor Prestes. III. Título.

CDD: 669.722

---

## TERMO DE APROVAÇÃO

DIONEI CONGER

### ESTUDO DA POROSIDADE EM PRODUTOS INJETADOS EM ALUMÍNIO SOB PRESSÃO

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica do Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, área de concentração Manufatura.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Carlos Augusto Silva de Oliveira  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Examinador externo



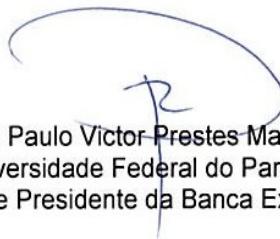
Prof. Dr. Ossimar Maranhão  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Examinador externo



Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes  
Universidade Federal do Paraná  
Examinador interno



Profª. Drª. Thaís Helena S. Flores-Sahagún  
Universidade Federal do Paraná  
Examinadora Interna



Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes  
Universidade Federal do Paraná  
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Curitiba, 15 de outubro de 2015.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus pela oportunidade concedida;

Ao prof. Marcondes pelo conhecimento e pela dedicação;

Aos meus futuros filhos Enzo e Lorena, minha nova fonte de inspiração;

À minha esposa, pelo amor, paciência e companheirismo;

Aos meus pais por terem me ensinado a matéria da vida;

À minha irmã pela parceria;

À UFPR pela estrutura, transparência e organização;

À FBM Fabrica Brasileira de Moldes pelo incentivo, oportunidade e reconhecimento;

À Metalkraft pela parceria profissional e pelas simulações oferecidas;

À Metalúrgica Starcast pela parceria profissional e pelas injeções das amostras;

À Alumec pela parceria profissional e pelas análises no raios X;

Aos meus amigos Cleberson, Alisson e Fernando, pelos momentos difíceis e felizes dessa caminhada, porém, muito gratificante.

## EPÍGRAFE

“Eu consigo calcular o movimento dos corpos celestiais,  
mas não a loucura das pessoas”.

Isaac Newton

## RESUMO

A porosidade resultante do processo de injeção de alumínio sob pressão corresponde a 35% da falha desse processo. A determinação da origem dos poros e definição dos mecanismos de solução é complexa, pois há vários fatores que induzem a sua ocorrência. Assim, é comum se empregar alternativas de processo e de engenharia para tentar resolver o problema. Diante de tal complexidade, procurou-se propor alternativas de como aplicar os métodos dos elementos finitos para minimizar a probabilidade da ocorrência de poros em produtos injetados em alumínio através do processo *HPDC*. Procurou-se, ainda, verificar quais seriam as melhores configurações de engenharia e de processo objetivando diminuir o volume de poros em produtos injetados em alumínio culminando com o desenvolvimento de uma equação que represente o comportamento e a origem da porosidade. Para estudar a origem e o comportamento da porosidade foram analisadas algumas condições de projeto e de processo, nas quais foram realizadas simulações computacionais, utilizando-se os softwares Magma e Click2Cast, para injeção de alumínio sob pressão e *Jump* para análise estatística de resultados. Observou-se que através de fluxo e de solidificação, pode-se entender o comportamento da porosidade em produtos injetados em alumínio sob pressão. Verificou-se ainda que a velocidade no canal de alimentação e o tempo de preenchimento não interferem na origem de porosidade, porém o menor tempo de solidificação é o parâmetro de injeção que resulta em um menor volume de porosidade. A partir do levantamento de um banco de dados, foi possível desenvolver uma equação estatística para descrever o comportamento da porosidade incluindo todos os parâmetros de injeção utilizados no processo *HPDC*.

Palavras-chave: Processo de injeção de alumínio sob pressão. Alumínio. Porosidade. Simulação Numérica.

## ABSTRACT

The resulting porosity is responsible to 35% of failures on the high-pressure aluminum die casting process. The determination of the origin and setting the pore elimination is a complex mechanism. There are several factors that induce their occurrence. Thus, it is common to employ process and engineering alternatives in order to try to solve the issue. Faced with such complexity we tried to understand how to apply the finite element methods to minimize the occurrence of pores in high-pressure die casting products. The motivation was to determine the best engineering and process settings to reduce the pore volume in aluminum injected products. The aim of this study was to develop a methodology in order to generate an equation that represents the porosity behavior. In order to do that, the results obtained with the variation of some boundary conditions which were applied to computer simulations in commercial dedicated software (Magma, Click2Cast and Jump) were analyzed. It was observed that a flow and solidification analysis of the product in the mold can determine the probability of occurrence of pores in the product already during injection process.

Keywords: High-pressure die casting. *HPDC*. Aluminum. Porosity. Numerical simulation.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Distribuição dos problemas de produtos injetados em alumínio no processo <i>HPDC</i> (NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, 2011).....	23
FIGURA 2 - Aprisionamento de ar variando com a geometria do canal de alimentação (KIM <i>et al.</i> , 2008); a] Canal de ataque tipo leque; b] Canal de ataque com múltiplas entradas .....	26
FIGURA 3 - Tipos de poros e suas origens. a) Poro gerado na solidificação. a) Poro gerado por ar preso durante o fluxo de injeção. b) Poro gerado por ar preso durante o fluxo de injeção (KIRKMAN, 2006). .....	27
FIGURA 4 - Porosidade no alumínio, antes e depois do processo <i>HPDC</i> (ZUO <i>et al.</i> , 2010).....	29
FIGURA 5 - Variação de densidade em função da temperatura (CIMM, 2016). .....	32
FIGURA 6 - Porosidade variando em função da temperatura (CIMM, 2016). .....	33
FIGURA 7 - – Dendritas variando conforme o intervalo de solidificação(CIMM, 2016). a) A contração pode ocorrer entre os braços da dentrita; b) Braços secundários menores resultam em distribuição mais uniforme de porosidade; c) Braços primários podem evitar a ocorrência de contração.....	34
FIGURA 8 - Solubilidade do Hidrogênio no alumínio (Apelian <i>et al.</i> , 2006). .....	35
FIGURA 9 - Diagrama de causa e efeito para o surgimento de poros (TSOUKALAS, 2008) .....	37
FIGURA 10 - Esquema molde e injetora de alumínio <i>HPDC</i> (ABAL, 2011). .....	38
FIGURA 11- Temperatura da liga de alumínio injetada variando com a geometria do canal de alimentação (KIM <i>et al.</i> , 2008).....	39
FIGURA 12 - Representação das velocidades de injeção (DO AUTOR, 2016). .....	40
FIGURA 13 - Distribuição vetorial do fluxo de injeção (DO AUTOR, 2016). .....	41
FIGURA 14 - Distribuição de velocidade durante o processo de injeção (AUTOR, 2016).....	42
FIGURA 15 - Preenchimento variando com a velocidade de primeira fase e velocidade de segunda fase (KIMM <i>et al.</i> , 2011).....	43

FIGURA 16 - Quantidade de ar preso durante o preenchimento das cavidades (AUTOR, 2016).....	44
FIGURA 17 - Diferentes tipos de ligas de alumínio e suas respectivas taxas de resfriamento (Jorstad <i>et al.</i> , 2008). a) Liga A413, com taxa de resfriamento 0,7°C/s; b) Liga EU380, com taxa de resfriamento 0,6°C/s; c) Liga 318, com taxa de resfriamento 0,4°C/s. d) Liga 356, com taxa de resfriamento 0,7°C/s; e) Liga 206, com taxa de resfriamento 0,6°C/s (JORSTAD <i>et al.</i> , 2007).....	46
FIGURA 18 - Solidificação da liga de alumínio.....	49
FIGURA 19 - Esquema do comportamento do alumínio durante o estado de solidificação.....	49
FIGURA 20 - Simulação do comportamento do alumínio durante a solidificação (AUTOR, 2016).....	51
FIGURA 21 - Efeito do spray desmoldante na transferência de calor (Chu <i>et. al.</i> , 1991).....	54
FIGURA 22 - Gradiente de temperatura durante o preenchimento (AUTOR, 2016).....	56
FIGURA 23 - Aplicação dos elementos tetraédricos, condição de contorno de pré-processamento (AUTOR, 2016).....	59
FIGURA 24 - Área de trabalho do software Magma (AUTOR, 2016).....	61
FIGURA 25 - Área de trabalho do software Click2Cast (AUTOR, 2016).....	61
FIGURA 26 - Área de trabalho do software Jump (AUTOR, 2016).....	62
FIGURA 27 - Simulação da distribuição de tempo de injeção (AUTOR, 2016).....	63
FIGURA 28 - Preenchimento completo (AUTOR, 2016). ....	64
FIGURA 29 - Comportamento das áreas de alimentação (AUTOR, 2016).....	65
FIGURA 30 - Comportamento do fluxo de injeção (do Autor, 2016).....	66
FIGURA 31 - Fração de porosidade teórica como uma função de intensificação da pressão de injeção (BREVICK <i>et. al.</i> , 2001).....	68
FIGURA 32 - Fluxograma proposto para a pesquisa.....	81
FIGURA 33 - Fluxograma proposto para a realização das simulações.....	82

FIGURA 34 - Modelamento do produto do corpo de prova. ....	83
FIGURA 35 - Forno de indução elétrica.....	84
FIGURA 36 - Injetora de alumínio para o processo <i>HPDC</i> .....	85
FIGURA 37 - Gráfico da pressão de injeção.....	87
FIGURA 38 - Velocidade no canal de alimentação em função da velocidade de primeira e de segunda fase. ....	91
FIGURA 39 - Tempo de preenchimento em função da velocidade de primeira e de segunda fase.....	93
FIGURA 40 - Tempo de solidificação em função da velocidade de primeira e de segunda fase.....	95
FIGURA 41 - Porosidade em função da velocidade de primeira e de segunda fase... ..	97
FIGURA 42 - Raios X da simulação comparado ao produto final.....	97
FIGURA 43 - Equipamento para análise em raios X.....	100
FIGURA 44 - Porosidade detectada através do equipamento do raio-x.....	101

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Relação do tamanho e quantidade de poros em função da velocidade de segunda fase (Wilczek <i>et. al.</i> , 2015).....	40
TABELA 2 - Classificação de poros (ASTM E 505).....	69
TABELA 3 - Classificação de poros por contração (ASTM E 505).....	70
TABELA 4 - Classificação de poros por ar preso e encontro de fluxo (ASTM E 505). .....	71
TABELA 5 - Configuração estrutural do molde.....	83
TABELA 6 - Definição dos parâmetros de injeção. ....	86
TABELA 7 - Composição química da liga 308.....	86
TABELA 8 - Definição dos parâmetros de injeção .....	88
TABELA 9 - Velocidade no ataque.....	90
TABELA 10 - Tempo de preenchimento.....	92
TABELA 11 - Tempo de solidificação.....	94
TABELA 12 - Porosidade .....	96
TABELA 13 - Resultados gerais do pós processamento.....	98

## LISTA DE SÍMBOLOS

%P - Percentual de porosidade.

$\beta$  - Fator de contração.

$V^*$  - Volume de alumínio.

$V_c$  - Volume da cavidade.

$\alpha$  - Fração do gás.

$T$  - Temperatura.

$\rho$  - Densidade.

$\nu$  - Quantidade de gás.

$\nu^*$  - Limite de solubilidade do gás.

$P$  - Pressão inicial.

$\bar{V}$  - Velocidade média.

$g$  - Gravidade.

$z$  - Altura;

$_1$  - Início do fluxo.

$_2$  - Final do fluxo.

$f$  - Fator de atrito.

$L$  - Comprimento.

$D$  - Diâmetro hidráulico.

$K$  - Coeficiente de perda de carga.

$R_e$  - Número de Reynolds.

$\mu$  - Viscosidade.

$p$  - Porosidade.

$v_p$  - Velocidade de primeira fase.

$v_s$  - Velocidade de segunda fase.

$v_c$  - Velocidade no canal.

$t_p$  - Tempo de preenchimento.

$t_s$  - Tempo de solidificação.

$t_m$  - Temperatura do molde.

$t_a$  - Temperatura do alumínio

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
	1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	16
	1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	17
	1.3 HIPÓTESE.....	18
	1.4 FATOR INOVATIVO .....	18
	1.5 OBJETIVO GERAL .....	18
	1.6 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	19
	1.7 OBJETIVO SECUNDÁRIO .....	19
	1.8 JUSTIFICATIVAS.....	20
	1.9 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO BILIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
	2.1 POROSIDADE NO PROCESSO <i>HPDC</i> .....	22
	2.1.1 Microporosidade e Macroporosidade.....	31
	2.2 O PROCESSO <i>HPDC</i> .....	35
	2.2.1 Velocidades no processo <i>HPDC</i> .....	39
	2.2.2 Tempo de preenchimento no processo <i>HPDC</i> .....	44
	2.2.3 Tempo de solidificação no processo <i>HPDC</i> .....	45
	2.2.4 Parâmetros para o processo <i>HPDC</i> .....	52
	2.3 SIMULAÇÃO APLICADA AO PROCESSO <i>HPDC</i> .....	55
	2.4 PRESSÃO DE INJEÇÃO NO PROCESSO <i>HPDC</i> .....	67
	2.5 AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE POROSIDADE .....	69
	2.6 PERDA DE CARGA NO PROCESSO <i>HPDC</i> .....	72
	2.7 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.....	77
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>80</b>
	3.1 MOLDE PARA INJEÇÃO DAS AMOSTRAS.....	82

3.2 INJEÇÃO DAS AMOSTRAS .....	84
3.3 APLICAÇÃO DAS HIPÓTESES NO PROCESSO .....	86
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>90</b>
4.1 AVALIAÇÃO DAS AMOSTRAS EM EQUIPAMENTOS DE RAIOS X.....	99
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>102</b>
<b>6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>103</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>104</b>
<b>APÊNDICE 1 - DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE .....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE 2 - TEMPO DE PREENCHIMENTO.....</b>	<b>114</b>
<b>APÊNDICE 3 - TEMPO DE SOLIDIFICAÇÃO.....</b>	<b>119</b>
<b>APÊNDICE 4 - POROSIDADE.....</b>	<b>124</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A porosidade resultante em produtos injetados em alumínio sob pressão é o maior modo de falha desse processo. A determinação da origem dos poros e definição dos mecanismos de solução é complexa, devido a grande quantidade de parâmetros de processo. É comum se empregar alternativas de processo e de engenharia para tentar resolver o problema. Diante de tal complexidade, procurou-se resolver problemas relacionados ao processo com o auxílio do métodos dos elementos finitos, visando minimizar a probabilidade da ocorrência de poros em produtos injetados em alumínio através do processo *HPDC* (*high pressure die casting*), quais são as melhores configurações de engenharia e de processo objetivando diminuir o volume de poros em produtos injetados em alumínio e como desenvolver uma equação que represente o comportamento e a origem da porosidade. Para estudar a origem e o comportamento da porosidade, foram analisados os principais parâmetros de injeção, na qual foram aplicadas a simulações computacionais utilizando-se os softwares Magma e Click2Cast, para injeção de alumínio sob pressão e *Jump* para análise estatística de resultados.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os produtos injetados em alumínio obtido através do processo *HPDC*, possibilitam redução significativa de massa, produtos com geometrias complexas, alta produtividade e aumento de qualidade quando comparada ao processo de injeção por gravidade.

Atualmente, o processo de injeção sob pressão corresponde a 70% do mercado de produtos fundidos em alumínio, quando comparado aos processos de injeção por gravidade e injeção em baixa pressão. Destaca-se a indústria automotiva como a maior consumidora de produtos obtidos através desse processo, como por exemplo bloco de motor, caixa de câmbio, carcaças de bombas de água, carcaças de barra de direção, peças para suspensão etc...

Apesar de que o processo estudado ofereça inúmeras vantagens, os produtos obtidos através do processo *HPDC* encontram limitações de aplicações correlacionadas à porosidade. Tais limitações se caracterizam por falhas estéticas, redução da resistência estrutural decorrente das perdas volumétricas e o



comprometimento dos produtos que venham a passar posteriormente pelo processo de usinagem, como por exemplo, abertura de uma rosca em uma peça injetada em alumínio.

## 1.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

As soluções dos problemas derivados dos poros são complexas. Isso porque os parâmetros do processo de injeção normalmente são definidos através de soluções práticas já consolidadas, amostragem ou tentativa e erro. Tomadas de decisões experimentais, mesmo quando feita por profissionais experientes, nem sempre são eficientes, porquanto há um grande número de fatores de processo e de engenharia envolvidos.

Verificou-se que no universo de 90% de todas as amostras fraturadas, como resultado deste defeito microestrutural, a porosidade foi a principal responsável pela origem de trincas em injetados obtidos através do processo *HPDC* (AMMAR *et al.*, 2008).

Grande parte das indústrias automotivas utilizam o cabeçote de motores em injetados em alumínio, pois são extremamente leves e eficientes em consumo e potência. Em sua fabricação são utilizadas as técnicas mais avançadas de fundição de alumínio, entre máquinas e equipamentos, que englobam todo seu processo de fabricação. Entretanto, mesmo com a tecnologia e com a produção em larga escala, verifica-se em alguns casos o surgimento de porosidades (FARIA *et al.*, 2014).

O interesse na metalurgia do alumínio, bem como a preocupação com a porosidade em produtos injetados em alumínio através do processo *HPDC*, foi renovada na década de 1990. Tal fato ocorreu quando mancais de eixo de comando foram produzidos pela primeira vez para a General Motors e Daimler-Chrysler através do processo *HPDC*. A fabricação desses produtos ultrapassam 100 milhões de unidades por ano, isso para um único motor. O sucesso destes produtos, já produzidos em alumínio, demandou na ampliação do interesse da indústria na fabricação de vários produtos. A evolução contínua da engenharia e da aplicação desses produtos é acompanhada constantemente, devido a maiores solicitações mecânicas que podem ser solicitadas com frequência e, por isso, propriedades mecânicas, ensaios compressão e de tração, resistência elevada temperatura,

estabilidade e resistência à fadiga são estudados com alta intensidade no segmento de alumínio injetado através do processo *HPDC* (STEEDMAN *et al.*, 2012).

### 1.3 HIPÓTESE

Para viabilizar a pesquisa desejada, foi utilizado um molde para injeção de alumínio com um histórico de alta probabilidade de porosidade. Através da experiência prática, acredita-se que a velocidade de primeira fase e da segunda fase do processo *HPDC* poderá ser a origem da porosidade. Para validar os resultados obtidos através das simulações, foram injetados amostras físicas e avaliadas em equipamento de raio X. A pesquisa foi concluída com a proposta de uma equação matemática, baseada em dados estatísticos, na qual irá representar o comportamento da porosidade.

### 1.4 FATOR INOVATIVO

A partir do estado da pesquisa atual, se fez relevante pesquisar métodos para desenvolver ferramentas que representem com confiabilidade, o comportamento da porosidade através de simulações numéricas computacionais.

O fator de inovação da presente tese é o desenvolvimento de uma metodologia, baseada na vasta experiência profissional do autor no tema proposto, cuja análise aprofundada a partir de um banco de dados, permitiu desenvolver uma equação matemática estatística que represente através dos principais parâmetros de processo, o comportamento da porosidade.

A metodologia foi viabilizada pela análise por raios X da porosidade das amostras experimentais, obtidas através do processo de injeção sob pressão, as quais foram utilizadas para validar os resultados das simulações computacionais e para permitir o desenvolvimento da equação matemática apresentada.

### 1.5 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da presente pesquisa é determinar o comportamento da porosidade em produtos injetados através do processo *HPDC*, como resultado desenvolver uma equação matemática estatística que descreva numericamente o

comportamento da porosidade, aplicando os principais parâmetros de injeção sob pressão.

## 1.6 OBJETIVO ESPECÍFICO

Para entender o comportamento da porosidade presente em produtos obtidos através do processo *HPDC*, espera-se:

- a) Realizar simulações de fluxo de injeção, visando obter resultados de tempo de preenchimento.
- b) Realizar simulações de fluxo de injeção, visando obter resultados de velocidade de injeção.
- c) Realizar simulações de solidificação, visando obter resultados de tempo de solidificação.
- d) Realizar simulações de solidificação, visando obter resultados de volume de porosidade.
- e) Obter amostras físicas através do processo *HPDC* de um produto com histórico real de porosidade.
- f) Obter imagens das amostras físicas através de equipamento de raios X específico e comparar com resultados obtidos nas simulações computacionais.
- g) Desenvolver uma equação matemática, na qual contemple todos os parâmetros de injeção de alumínio sob pressão.

## 1.7 OBJETIVO SECUNDÁRIO

Para poder entender o comportamento da porosidade, foi necessário entender:

- a) Tempo de preenchimento durante o fluxo de injeção;
- b) Velocidade no canal de alimentação;
- c) Tempo de solidificação;
- d) Volume de porosidade.

## 1.8 JUSTIFICATIVAS

A presente pesquisa é de grande interesse para o segmento acadêmico e de grande utilidade para o segmento da indústria que utiliza o processo *HPDC*, devido ao real e frequente problema que a porosidade representa para os produtos injetados em alumínio sob pressão.

Devido a confiabilidade nos resultados obtidos através de simulações quando comparado, aos resultados obtidos através de equipamento de raio-x, foram aplicadas nesta pesquisa os principais parâmetros do processo *HPDC*.

A utilização de um molde para injeção de alumínio sob pressão desenvolvido para o processo *HPDC*, com um histórico real de porosidade, foi à alternativa para a otimização de tempo e custos, bem como para a confiabilidade da pesquisa.

Ainda, conceitos errôneos de engenharia de produto, engenharia de molde ou falhas de processo podem resultar em produtos com porosidade, quando não se conhece a origem da falha. Essa incerteza, gera elevadíssimos custos de recuperação, tais como: retrabalho no molde, tentativas de processo de injeção, transportes, mão de obra e comprometimento do prazo de entrega do molde.

O alto custo de fabricação de um molde para o processo *HPDC*, associado ao alto risco, bem como o próprio custo do processo de injeção, inviabiliza testes práticos na injetora, ou seja, experimentos. Na indústria, esse custo é normalmente um somatório de horas de ferramentaria, aços, tratamentos térmicos, transporte e mão de obra, além da alta probabilidade de problemas de se ter que parar uma produção para a realização de um *try out*.

Diante do alto risco de construção de um molde, seja financeiro ou técnico, a simulação computacional permite que se executem virtualmente diferentes cenários de parâmetros de processo. A representação através de modelos matemáticos permite filtrar possíveis erros de projeto de molde de injeção e de processo, minimizando assim o tempo de desenvolvimento do projeto e, ainda diminui consideravelmente a probabilidade de prejuízos de grande valor agregado, gerados por decisões empíricas. As simulações, realizadas através dos métodos dos elementos finitos, representam explicitamente o comportamento e defeitos relatados na literatura (TENG *et al.*, 2009).

## 1.9 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta tese foi dividida seis em seções, sendo a primeira uma introdução sobre o trabalho desenvolvido, que trouxe a justificativa para os estudos e para a realização dos objetivos. A segunda seção apresentou a fundamentação teórica do trabalho e a descrição do tema. A terceira seção destinou-se a apresentação da metodologia utilizada no trabalho e do planejamento do experimento. Na quarta seção foram mostrados os resultados obtidos, comparando-os aos objetivos iniciais. Na quinta seção é apresentada a conclusão final da tese e na sexta seção são registradas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BILIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentada uma coletânea sobre os referenciais bibliográficos, objeto da presente tese.

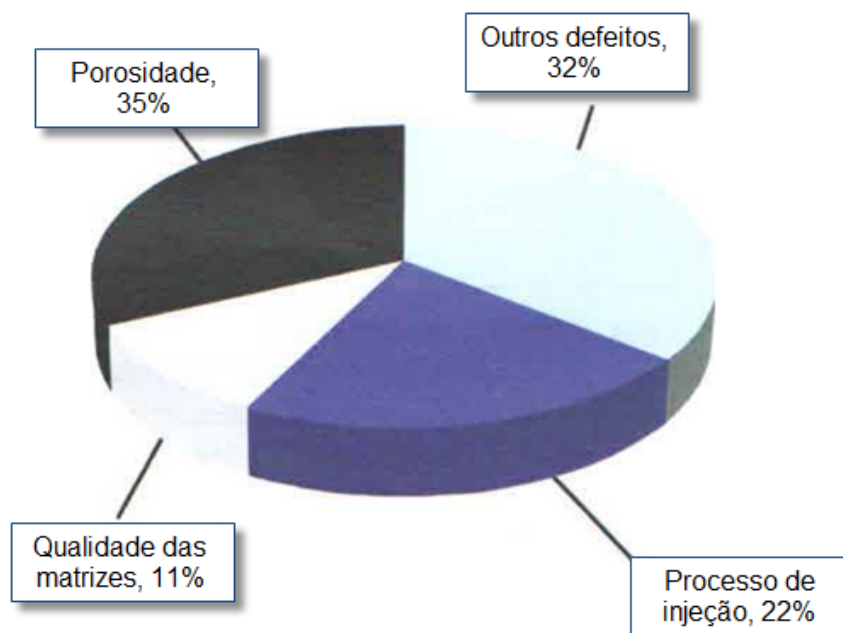
### 2.1 POROSIDADE NO PROCESSO *HPDC*

A porosidade é definida como a falha de preenchimento que se formaram durante o preenchimento de um produto através do processo de injeção sob pressão, é considerada o defeito mais frequente, quando comparado ao processo de injeção por gravidade e baixa pressão. Este defeito reduz as propriedades mecânicas do produto, como a tensão de escoamento e a tensão de ruptura. Conseqüentemente, a porosidade é considerada, como a principal causa de rejeição de componentes injetados através do processo *HPDC*. Há dois principais fatores que contribuem para a formação de porosidade na solidificação das ligas de alumínio. O primeiro é a contração resultante da variação volumétrica durante a solidificação, enquanto o segundo é o aprisionamento de gás, durante o fluxo de injeção (AMMAR *et al.*, 2008).

Entender o comportamento da porosidade é difícil, devido à carência de informações do processo *HPDC*, além da diversidade de opções de parâmetros de injeção possíveis durante a injeção. A combinação, da complexidade do processo e, da presença de gradientes de temperatura presentes em uma matriz para injeção através do processo *HPDC*, faz com que as simulações computacionais nem sempre representem o comportamento da injeção de forma conclusiva (MILLER, 2010).

Sabe-se que 35%, são o percentual de defeito que a porosidade representa em produtos obtidos através do processo *HPDC*. A porosidade é o problema mais frequente presente no processo *HPDC* (NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, 2011). A representação esquemática, da distribuição de falhas derivadas do processo *HPDC* está ilustrada na figura 1.

FIGURA 1 – Distribuição dos problemas de produtos injetados em alumínio no processo *HPDC* (NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, 2011).



A porosidade está presente na maioria dos produtos injetados em alumínio através do processo *HPDC*, porém é a classificação da porosidade, que aprova o produto para uma determinada aplicação. O problema é mais evidente em produtos usinados e em produtos estanques, quando há produtos reprovados pela presença de porosidade, poderão resultar em prejuízos com valores expressivos (NADCA, 2011).

A origem da formação da porosidade, bem como a sua caracterização, tem sido alvo de frequentes e intensos estudos. Esse tipo de defeito pode causar retrabalho e até rejeição do produto final. Quando a produção é em grande escala, na ordem aproximada de 100.000 ciclos, o prejuízo é imenso. A porosidade é um problema comum em produtos injetados através do processo *HPDC* e pode ser encontrada em injetados sob diversas condições, ou seja, em diversas escalas de porosidade.

Produtos com porosidade quando injetado através do processo *HPDC*, tem maior probabilidade de trincas no decorrer do seu ciclo de vida. Portanto, é a principal responsável pela redução da vida à fadiga, sendo que 90% de todas as amostras examinadas com porosidade tendem a fraturar, devido à falha

microestrutural. Sendo assim a resistência à fadiga diminui à medida que o tamanho dos poros aumenta, e vice-versa (AMMAR *et al.*, 2008).

A porosidade pode estar presente já nos lingotes de alumínio, quando submetidos a uma intensa carga de cisalhamento, poderão ter seus filmes de óxido dissipados quando refundido e injetado, podendo atuar como centros de nucleação e reduzindo o tamanho de grão. Essa é uma opção eficiente, se o objetivo for o refino de grãos do alumínio. Quando se tem grãos de alumínio refinados, diminui-se a probabilidade de filmes de óxido durante o processo de injeção, que são considerados prejudiciais ao produto final, pois pode resultar na formação de porosidade (ZUO *et al.*, 2010).

O comportamento da porosidade também foi estudado através da queda de pressão de diferentes espumas de alumínio, quando inseridas em um túnel de vento. As medições foram realizadas utilizando o ar como fluido de arrefecimento, as espumas apresentaram poros com tamanho variando entre 0,906 a 0,970mm de diâmetro. Os resultados experimentais mostraram que a permeabilidade aumenta com o diâmetro dos poros, enquanto que o coeficiente de inércia depende apenas da porosidade (MANCIN *et al.*, 2012).

A porosidade gerada através do processo *HPDC* tem sido sempre um problema constante. A necessidade de design inovador, bem como a necessidade estrutural cada vez maior de produtos injetados em alumínio, exigidas pela indústria, ficou praticamente impossível ter produtos sem porosidade. Felizmente há recursos práticos na injetora, que permitem minimizar o volume de poros. A formação da porosidade em ligas de alumínio é de grande interesse para a indústria e para o segmento acadêmico, pois sua presença causa redução das propriedades mecânicas dos produtos obtidos a partir desse processo, mas também compromete a qualidade acabamento superficial. Estudos têm comprovado que a porosidade é um fenômeno complexo, e que o seu volume final, tamanho e distribuição é determinada por vários parâmetros do processo de injeção (TSOUKALAS, 2008).

A maior probabilidade de surgimento de porosidade ocorre em volumes que apresentam um maior percentual de fração líquida e não há material sólido para a restrição da formação da porosidade. Independente do percentual de concentração de hidrogênio no alumínio injetado, provavelmente surgirá porosidade (KIRKMAN, 2006).

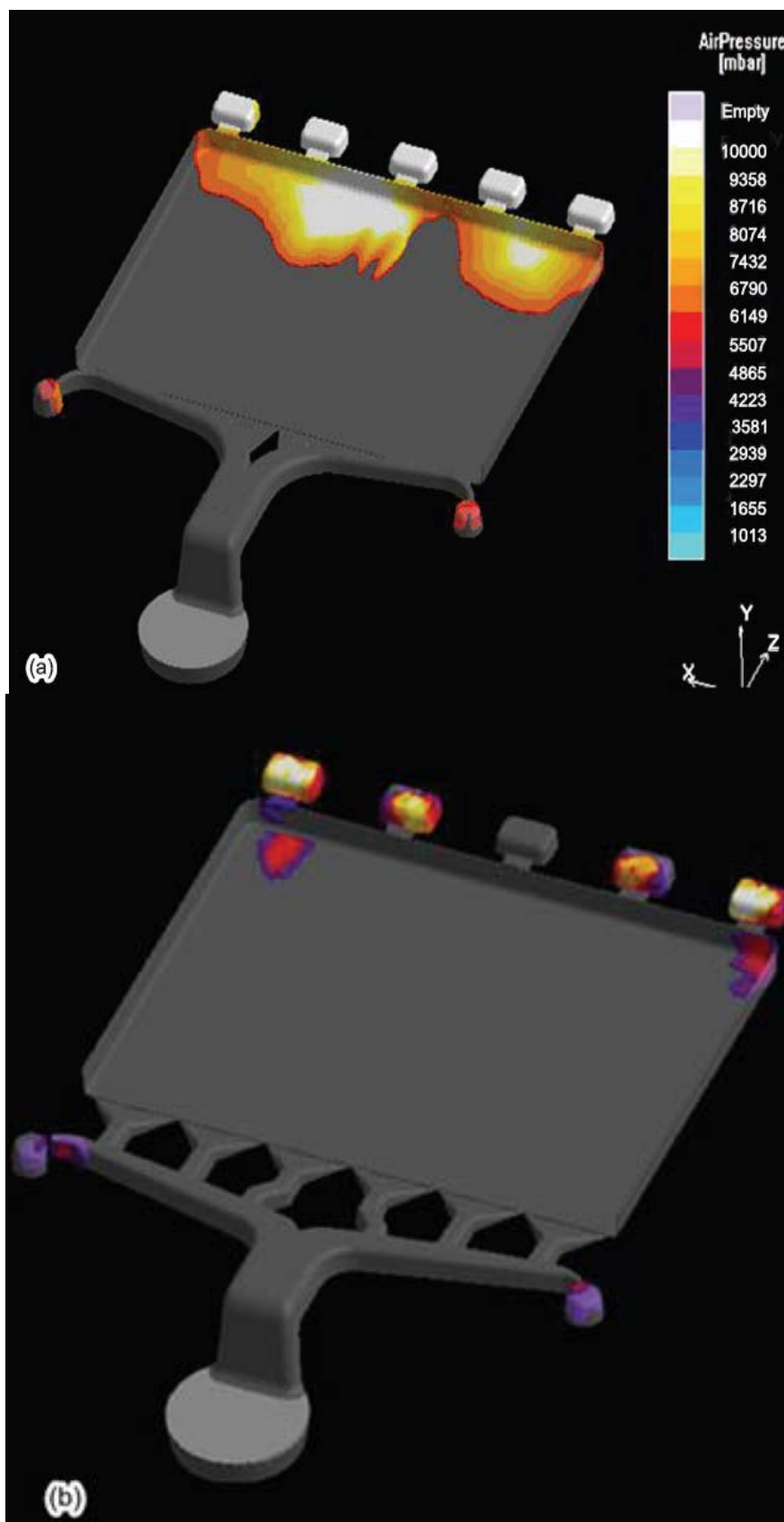


Quanto mais volume de porosidade, menor será a densidade do produto, devido aos vazios que ocupam o volume total da peça injetada, resultando em possíveis concentradores de tensões, e conseqüentemente, aumentando a probabilidade de fissuras e fraturas. Além disso, com base em princípios do mecanismo de fratura, o tamanho dos poros é tão importante como a quantidade total de porosidade (AMINUL *et al.*, 2011).

O surgimento da porosidade, não pode é um problema estrutural do molde e sim, um possível problema de projeto do canal de alimentação, ou um problema conceitual do próprio produto, como a concentração de massa, ou também possíveis erros de processos *HPDC*. Na figura 2a), é possível verificar através de simulações, a influência da geometria dos canais de alimentação durante o preenchimento de uma cavidade de um molde. Na figura 2b), têm-se uma nova proposta de canal, é possível observar que se alterando o a trajetória do fluxo de injeção, altera-se também a variação de pressão dentro da cavidade.

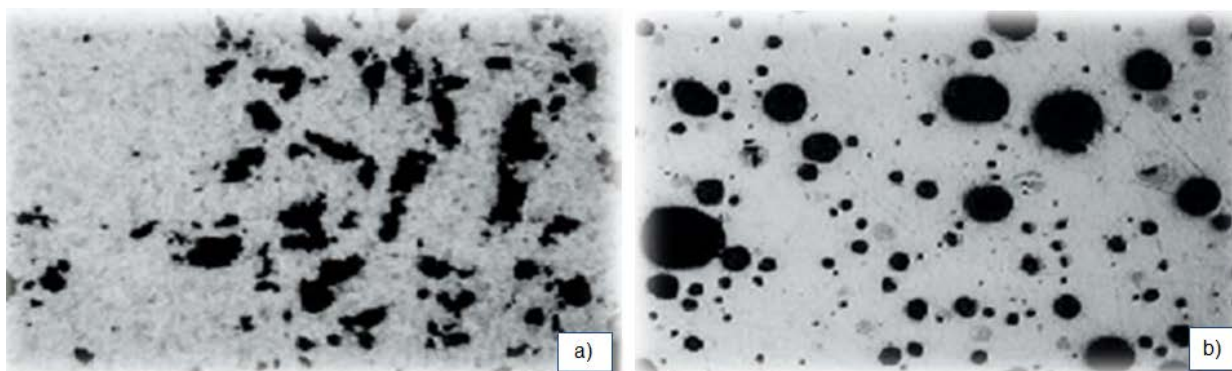
A porosidade pode ser decorrente das reações do alumínio injetado com a superfície do aço da matriz do molde, ou do gás dissolvido no metal. Estas têm morfologia distinta, dependendo do metal e liga que está se injetando e dependem também da geometria do produto desejado (MIDSON, 2008).

FIGURA 2 – Aprisionamento de ar variando com a geometria do canal de alimentação (KIM *et al.*, 2008); a] Canal de ataque tipo leque; b] Canal de ataque com múltiplas entradas



A figura 3 apresenta o comportamento e o formato dos poros (KIRKMAN, 2006). Na figura 3(a) tem-se o poro com geometria irregular, definida como porosidade por contração, derivada na solidificação. Já na figura 3(b), o poro apresenta geometria circular, definida como porosidade por ar preso, derivado do fluxo de injeção.

FIGURA 3 – Tipos de poros e suas origens. a) Poro gerado na solidificação (KIRKMAN, 2006). b) Poro gerado por ar preso durante o fluxo de injeção.



O tamanho e quantidade de poros interferem diretamente nas propriedades mecânicas do produto obtido no processo *HPDC*. Normalmente, a porosidade é gerada inicialmente durante contração do alumínio dentro do molde, durante a solidificação ou ainda pelo aprisionamento de ar levado para a cavidade durante o fluxo de injeção (HANGAI *et al.*, 2008).

Existem diversas causas que representam a origem e o comportamento da porosidade, derivados do processo *HPDC*. Entre elas pode-se citar o perfil da camada limite do fluxo de injeção, projeto da matriz, ar preso, saídas de ar, canais de alimentação, comportamento da solidificação, lubrificante no pistão da bucha de injeção e quantidade e formação de vapor de água durante o processo (KHAN *et al.*, 2011).

Segundo (VINARCIK, 2002), o percentual de porosidade total é descrito pelo somatório de poros durante a solidificação somada com a quantidade de poros gerados pelo ar preso. Ou ainda, de uma forma mais detalhada, o percentual de porosidade pode ser representado pela seguinte equação:

$$\%P = \frac{\beta V^*}{V_c} + \left( \alpha \frac{T \rho L}{(237K)P} \right) (v - v^*) \quad (\text{Equação 1})$$

onde,

$\%P$ , é o percentual de porosidade;

$\beta$ , é o fator de contração durante a solidificação em porcentagem;

$V^*$ , o volume de alumínio injetado em cm<sup>3</sup>;

$V_c$ , é o volume da cavidade em cm<sup>3</sup>;

$\alpha$ , é a fração do gás que não se apresenta para a solidificação encolhimento poros;

$T$ , é a temperatura do gás na cavidade fundição em graus Kelvin;

$\rho$ , é a densidade a liga que se encontra na temperatura de fusão em gramas por centímetro cúbico.

$v$ , quantidade do gás contido na peça injetada com temperatura de 273K e pressão de 1 atm a 100 g da liga.

$v^*$ , limite de solubilidade do gás com temperatura de 273K e pressão de 1 atm a 100 g da liga.

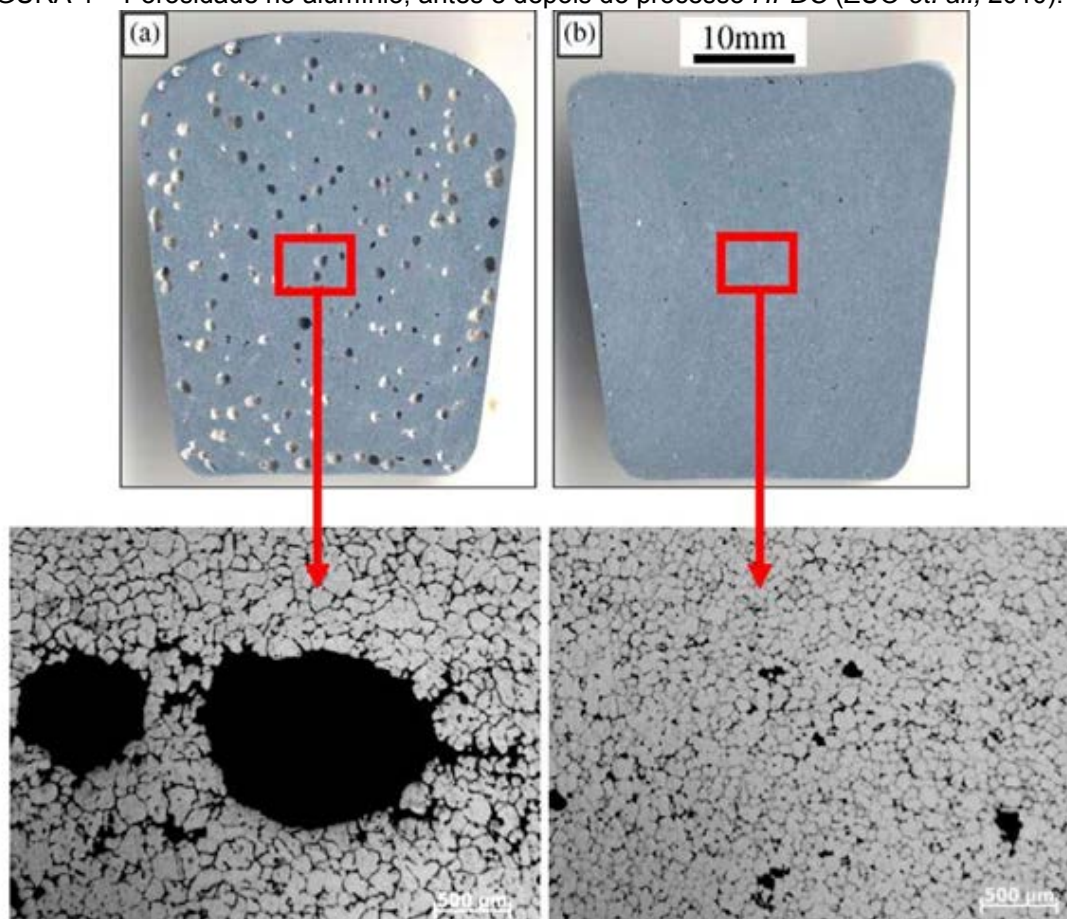
Sendo que na primeira parte da equação descreve a porosidade em relação à contração durante a solidificação, a segunda parte da equação descreve a porosidade devido ao aprisionamento de ar durante o fluxo de injeção.

Superfícies com fraturas em ligas de alumínio AE425 foram testadas a 300°C, para investigar para efeito da porosidade com a vida em fadiga destas ligas injetadas. Verificou-se que 88% de todas as amostras examinadas com porosidade tinha tendência a fraturar (AMMAR *et. al.*, 2008).

A porosidade também pode ser determinada a partir da medição da densidade do produto final. Esse experimento foi realizado em uma pesquisa, onde verificou-se a influência do corte no lingote de alumínio, antes da injeção. As amostras foram cortadas, lixadas e polidas para exame metalográfico, para visualização óptica da morfologia da porosidade. O cisalhamento intensivo do injetado não só pode conseguir o refinamento de grão, mas também, reduzir tanto o conteúdo como o tamanho da porosidade. A figura 4 apresenta a quantidade de

porosidade no alumínio nas amostras injetadas e cortadas antes – figura 4(a) e depois – figura 4(b) do processo *HPDC* (ZUO *et. al.*, 2010).

FIGURA 4 – Porosidade no alumínio, antes e depois do processo *HPDC* (ZUO *et. al.*, 2010).



Em matrizes para injeção de alumínio através do processo *HPDC*, os poros nem sempre serão irregulares. Tal fato pode ocorrer quando existir, uma grande quantidade de ar preso na matriz, decorrente de um canal mal dimensionado ou com pouca ocupação na bucha de injeção. É normal que apareçam poros com geometrias redondas, mesmo quando a contração seja a principal fonte de formação da porosidade. Quando verificado a presença de porosidade com formato com geometria irregular, esses podem ser derivados durante a contração do alumínio, que se formaram no início da solidificação (JORSTAD *et al.*, 2008).

Com base no conhecimento prático, a porosidade em produtos injetados em alumínio durante a contração é frequente, porém é possível realizar algumas estratégias para combater essas falhas. A melhor estratégia para reduzir a porosidade derivada da contração é, maximizando a seção de alimentação do

produto e injetar de tal forma que o fluxo de alumínio preencha a maior área possível do produto na região de concentração de massa, ainda é recomendável incluir circuito de refrigeração o mais próxima possível da porosidade. Deve-se evitar que ocorra encontro de fluxo, principalmente em canais com múltiplos ataques, pois nessa divisão poderá gerar possíveis turbulências dentro da cavidade, além de um preenchimento não simultâneo e com grande possibilidade de ocorrer emendas de injeção no produto final.

As seções de alimentação do produto a ser injetado, quando projetadas dentro das condições mínimas necessárias do processo, além de favorecer eficiência no preenchimento da matriz, pode reduzir a probabilidade de surgimento da porosidade. Ganhos paralelos também são obtidos em um canal de alimentação bem dimensionado, principalmente quando a velocidade é a ideal, devido à redução do desgaste no aço minimizado em função do efeito da erosão gerada, resultante da energia aplicada ao material da matriz. Seções de ataque, acima do necessário, comprometem o acabamento estético do produto, dificultam o processo de rebarbação dos canais e bolsas, além de diminuir o rendimento metalúrgico do processo.

A porosidade em produtos injetados em alumínio, através do processo *HPDC*, é causada normalmente pela contração devido à solidificação. Porém, os poros podem ser gerados também através de gases aprisionados dentro da matriz, resultantes do fluxo de injeção (HANGAI *et al.*, 2009).

A porosidade gerada pelo ar é atribuída ao aprisionamento de gás durante o fluxo de injeção durante o preenchimento da cavidade. Sendo que gás presente na liga de alumínio no seu estado líquido se desenvolve durante a sua solidificação. O processo *HPDC* minimiza o aprisionamento de ar quando comparado à injeção por gravidade, porém ao utilizar áreas transversais de alimentação maiores e velocidades de injeção mais baixas, ajuda evitar a turbulência. Ainda, a porosidade por ar preso também pode ser gerada a partir de gases dissolvidos no metal líquido, apesar de não ser um fator importante através do processo *HPDC*, devido aos tempos de ciclo ser baixo, se a solidificação for longa, pode permitir que o gás dissolvido formem porosidade (VINARCIK, 2002).

Pode-se afirmar que o hidrogênio é um problema de solubilidade da liga de alumínio durante o fluxo de injeção no processo *HPDC*, o aprisionamento de ar é um problema dinâmico durante o fluxo do canal de alimentação até o preenchimento da

cavidade, e a contração é um problema derivado da troca térmica (IRFAN *et al.*, 2010).

Eventualmente, a porosidade também pode surgir no processo *HPDC* através da evaporação de desmoldantes aplicados para a extração do produto injetado. Ainda em alguns casos, poderá haver combinação de porosidade de aprisionamento de ar, com porosidade de contração. A quantidade de porosidade em produtos injetados pelo do processo *HPDC* pode ser alterada através da variação e quantidade de hidrogênio ou pela capacidade de solidificação (AMINUL *et al.*, 2011).

Pesquisas classificaram e identificaram a fonte de poros no processo *HPDC* através de cores. Se o poro é muito escuro provavelmente um lubrificante está causando a porosidade. Já, se o poro for brilhante, a origem dessa porosidade é derivada da evaporação da água (NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, 2011).

Produtos injetados em alumínio através do processo *HPDC* apresentam, muitas vezes, defeitos microestruturais resultantes do processo de moldagem, sendo a porosidade a mais preocupante, seguida pelas inclusões metálicas. Estes defeitos são diretamente prejudiciais para a vida em fadiga do produto, a presença de porosidade potencializa a nucleação e a propagação de trincas (VANDERESSE *et al.*, 2011).

### 2.1.1 Microporosidade e Macroporosidade

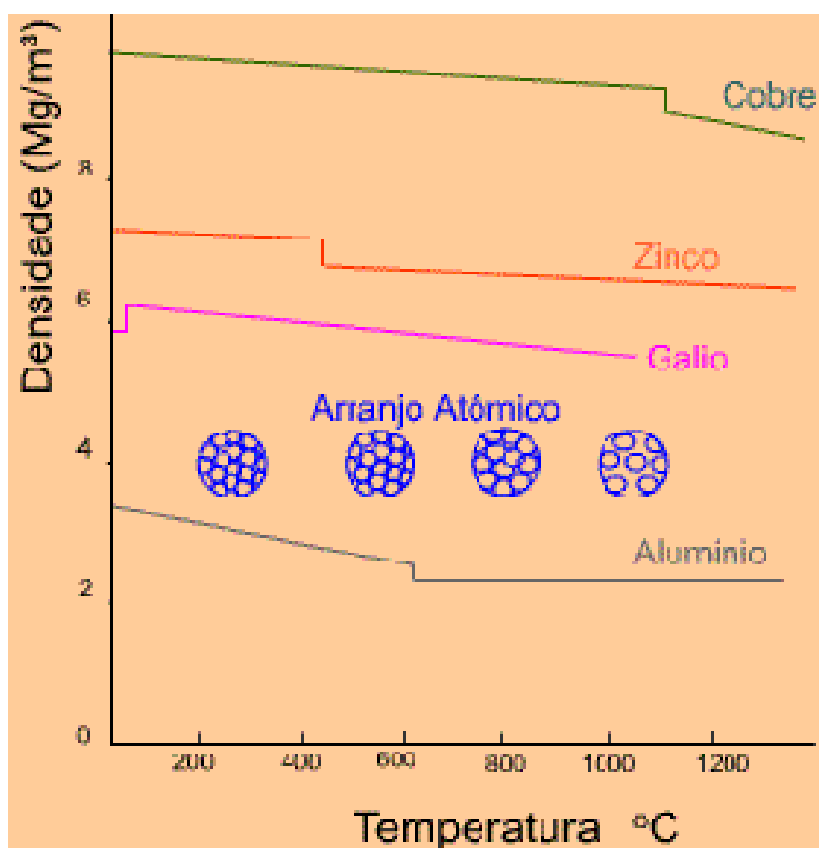
A porosidade gerada na contração, durante a solidificação do produto, podem ser classificadas como macroporosidade ou microporosidade. Sendo que o intervalo da solidificação determina se a porosidade é classificada, do tipo macro ou micro.

A macroporosidade pode ser resultado de uma alimentação inadequada, muitas vezes decorrente do projeto errado do canal de alimentação do molde, com fluxo de material insuficiente, excesso de velocidade, turbulência ou até mesmo a injeção em local inadequado. Esse poro é conhecido como porosidade por ar preso.

A microporosidade pode ser resultado da solidificação do alumínio, que muitas vezes é gerada em função de produtos com alta concentração de massa, bolsas posicionadas em local inadequado ou até mesmo o molde com refrigeração insuficiente. Esse poro é conhecido como, porosidade por contração (Campbell, 2004).

Durante a transformação do alumínio do seu estado líquido para sólido, ocorre um empacotamento dos átomos. Na grande maioria dos casos a transformação do alumínio é acompanhada pelo aumento da densidade. Na figura 5, é apresentada a variação densidade com a temperatura, sendo que quanto maior a temperatura, menor é a densidade (CIMM, 2016).

FIGURA 5 – Variação de densidade em função da temperatura (CIMM, 2016).

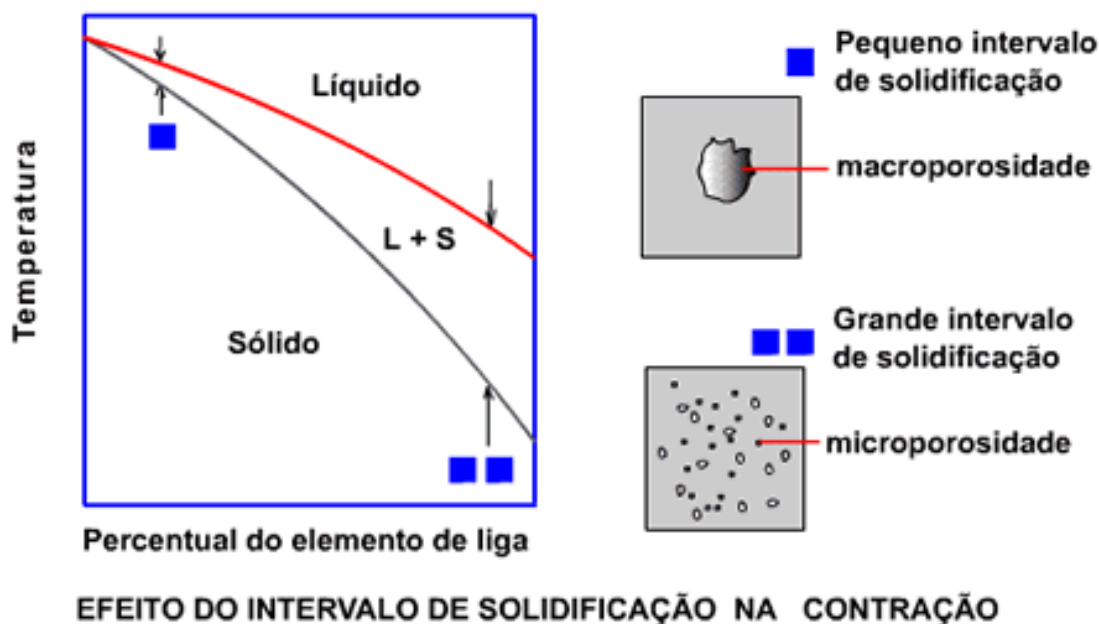


Na figura 6, verifica-se que quando há um pequeno intervalo de solidificação, apresentada na região L+S, existe a tendência de ocorrer macroporosidade. Esse fenômeno, são as ligas de alumínio que apesar de apresentar dendritas pequenas, possui grande contração durante a solidificação. As ligas metálicas com grande



intervalo de solidificação, como é o caso de alguns latões, apresentam dendritas grandes na interface L+S e tendem a gerar microporosidade (Campbell, 2004)

FIGURA 6 – Porosidade variando em função da temperatura (CIMM, 2016).



A macroporosidade é um defeito que se caracteriza pela falha do produto injetado durante a solidificação, concentradas em um único ponto do produto, localizada na última região a se solidificar, que resulta em um espaço vazio e com superfície interna de característica rugosa, formada pelas dendritas, causada pela contração durante a sua solidificação.

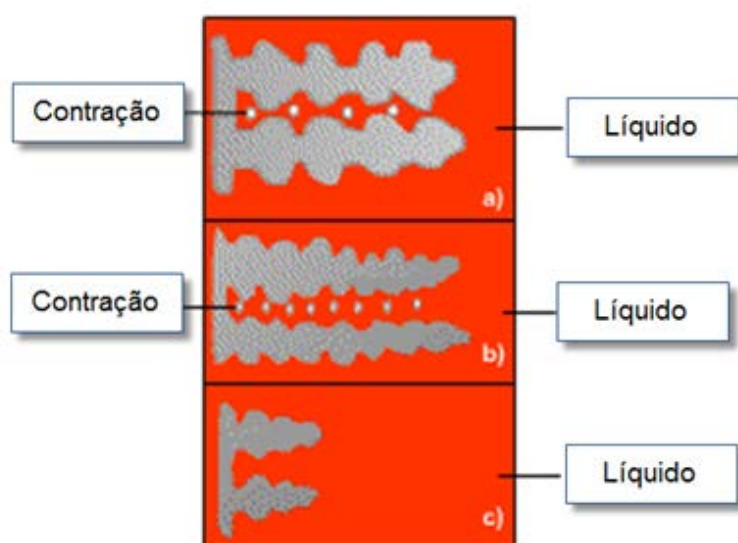
A forma e a localização da macroporosidade dependem da dissipação de calor na matriz do molde de injeção, um recurso para controlar e alterar a solidificação é incluir bolsas em regiões com concentração de massa do produto. Esse recurso é possível obter com precisão utilizando-se das simulações computacionais. Após a injeção dos produtos, as bolsas podem ser rebarbadas e reaproveitadas para um novo ciclo de injeção, minimizando a perda metalúrgica do processo (CIMM, 2016).

A microporosidade é caracterizada por suas pequenas dimensões e pela distribuição ao longo do produto injetado. Esse tipo de poro se forma quando as dendritas, presentes na frente de solidificação (interface L+S), são em grande escala. A microporosidade ocorre em função da dificuldade do metal líquido penetrar entre as dendritas na interface L+S, ocorrendo assim, a perda de carga. Com isto,

não são compensadas as contrações locais. O recurso utilizado para se evitar esse tipo de porosidade, é aumentar a extração de calor, ou seja, intensificar com circuitos de refrigeração na matriz.

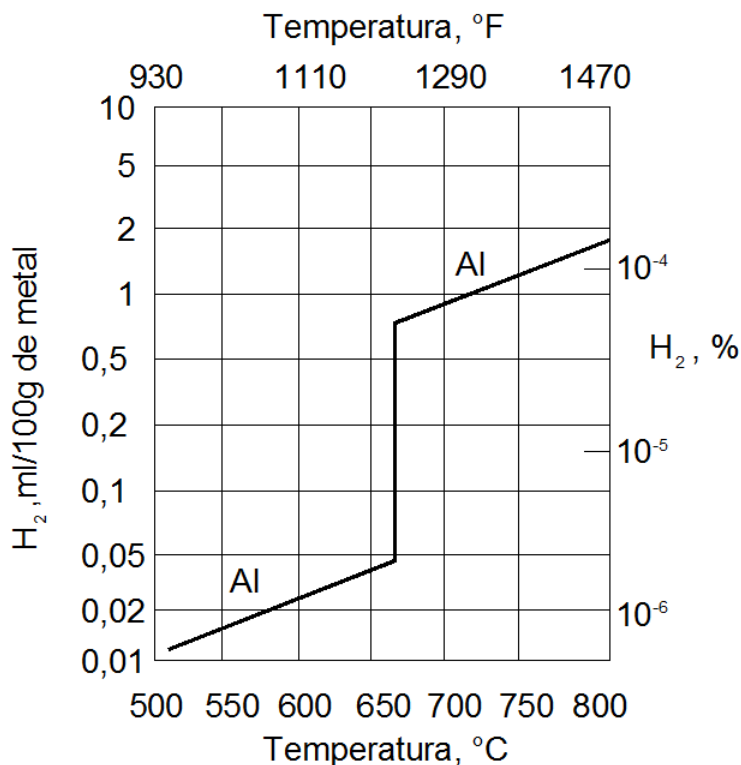
A figura 7 apresenta a formação típica das dendritas em materiais com pequeno intervalo de solidificação. Observa-se nesta figura que não há formação de porosidade. Para materiais com grande intervalo de solidificação, a formação típica das dendritas leva ao aparecimento de microporosidade (CIMM, 2016).

FIGURA 7 – Dendritas variando conforme o intervalo de solidificação(CIMM, 2016). a) A contração pode ocorrer entre os braços da dendrita; b) Braços secundários menores resultam em distribuição mais uniforme de porosidade; c) Braços primários podem evitar a ocorrência de contração



Em muitas situações, em função do hidrogênio, a porosidade é representada em forma de microporosidade. No entanto, em uma faixa estreita de solidificação e em uma faixa com maior viscosidade, pode-se tornar menor e o hidrogênio terá uma melhor chance de se aglutinar em poros maiores. A figura 8 apresenta a solubilidade do hidrogênio no alumínio, tanto no estado líquido, como no seu estado sólido. A solubilidade é mais baixa no alumínio sólido quando comparado com o alumínio líquido (APELIAN *et al.*, 2006).

FIGURA 8 – Solubilidade do Hidrogênio no alumínio (Apelian et al., 2006).



## 2.2 O PROCESSO HPDC

Para as fundições de alumínio que utilizam o processo *HPDC*, a definição da liga a ser utilizada normalmente vem especificado no desenho do produto desejado, porém mesmo assim é necessário o conhecimento teórico e prático da liga a ser injetada. A demanda de produtos injetados em ligas de alumínio tem sido crescente nos últimos anos e, este aumento ocorreu principalmente pelo fato do alumínio apresentar a densidade de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, que é considerada baixa, principalmente para a indústria automotiva, que tem como meta constante, a redução de peso em seus veículos para minimizar a emissão de poluentes.

No processo *HPDC*, as ligas de alumínio possuem densidade maior no seu estado sólido, em comparação com ao seu estado líquido, essa variação poderá resultar em porosidade durante a solidificação, principalmente em um intervalo pequeno de temperatura. Canal de alimentação direcionado em uma região não adequada do produto poderá resultar em porosidade devido à contração, principalmente nas regiões com excesso de concentração de massa. O ar aprisionado, proveniente de um canal de alimentação do molde com comportamento turbulento, também poderá resultar em porosidade. Gases solúveis na liga líquida

podem exceder o seu limite de solubilidade durante a solidificação e evoluir como um gás, também poderá resultar em porosidade. Decomposição de lubrificantes e produtos químicos utilizados durante a fabricação poderá resultar na formação de gás e o aprisionamento de metal (VINARCIK, 2002).

Segundo Mesquita *et al.* (2005), a indústria de fundição de alumínio do segmento *HPDC*, fornece produtos para mercados de diversos segmentos, dependendo da sua estrutura e capacidade técnica da equipe de processos, sendo que a indústria automotiva é o maior consumidor desse segmento.

No desenvolvimento do projeto de um molde, há parâmetros que interferem diretamente no desempenho do processo. Os parâmetros que podem ser apresentados são:

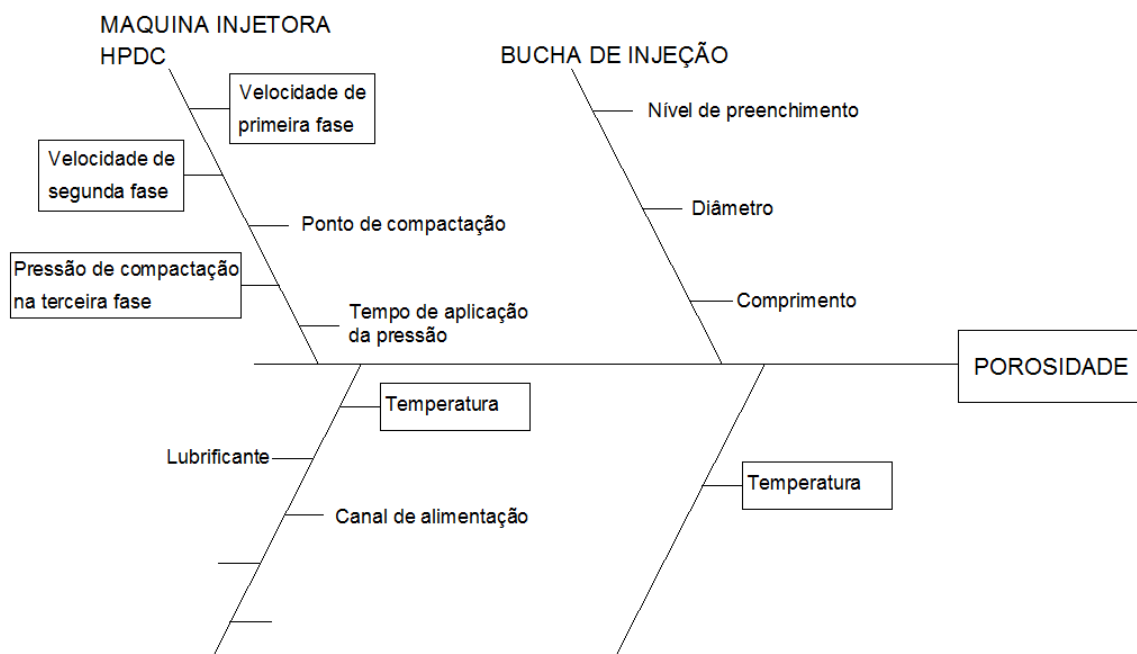
- a) Força de injeção;
- b) Pressão de injeção;
- c) Tempo médio de enchimento da matriz;
- d) Temperatura média da matriz;
- e) Velocidade do fluxo de alumínio nos canais de ataque;
- f) Velocidade de primeira fase;
- g) Velocidade de segunda fase;
- h) Tipo de liga;

O processo *HPDC* oferece vantagens como a alta produtividade, precisão dimensional, redução de operações adicionais de usinagem, excelente acabamento superficial, produtos com espessuras reduzidas, além da possibilidade de se obter geometrias complexas. Porém, o processo oferece algumas desvantagens, como o elevado custo das máquinas injetoras, investimento em moldes e suas manutenções preventivas e corretivas, além da necessidade de se ter uma equipe técnica experiente e qualificada (JIA *et al.*, 2011).

A porosidade em produtos obtidos através do processo *HPDC* depende de vários parâmetros de processo. Na figura 9 mostra um diagrama de causa e efeito, que foi desenvolvido de modo a identificar os parâmetros do processo de fundição sob pressão de alumínio. Pode-se destacar como parâmetros fundamentais, que contribuem para a origem de poros, a temperatura do forno, temperatura do molde, a

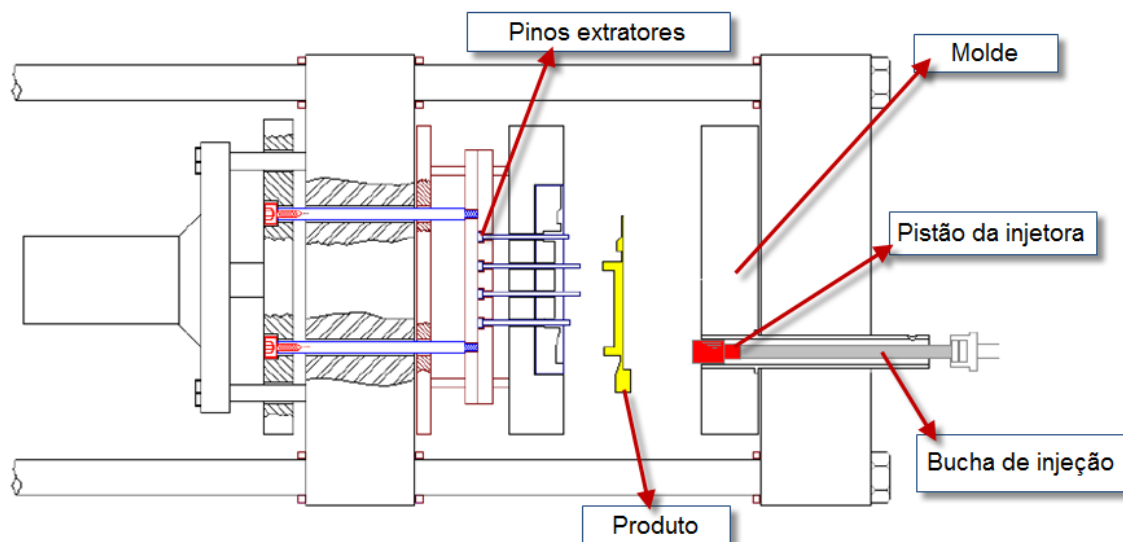
velocidade do êmbolo na primeira fase, a velocidade do êmbolo na segunda fase e a pressão na terceira fase (TSOUKALAS, 2008).

FIGURA 9 – Diagrama de causa e efeito para o surgimento de poros (TSOUKALAS, 2008)



Segundo Klobcar *et al.* (2007), as características de processo *HPDC*, normalmente, são as altas e diferentes temperaturas, sendo que a temperatura do alumínio no instante da injeção é cerca de 720 °C. Quando o alumínio é injetado na matriz do molde, as velocidades no canal de alimentação do produto encontram-se na faixa de 30 a 40 m/s. Já, as pressões de injeção são da ordem de 500 a 1000 bar, dependendo da espessura, acabamento e aplicação do produto.

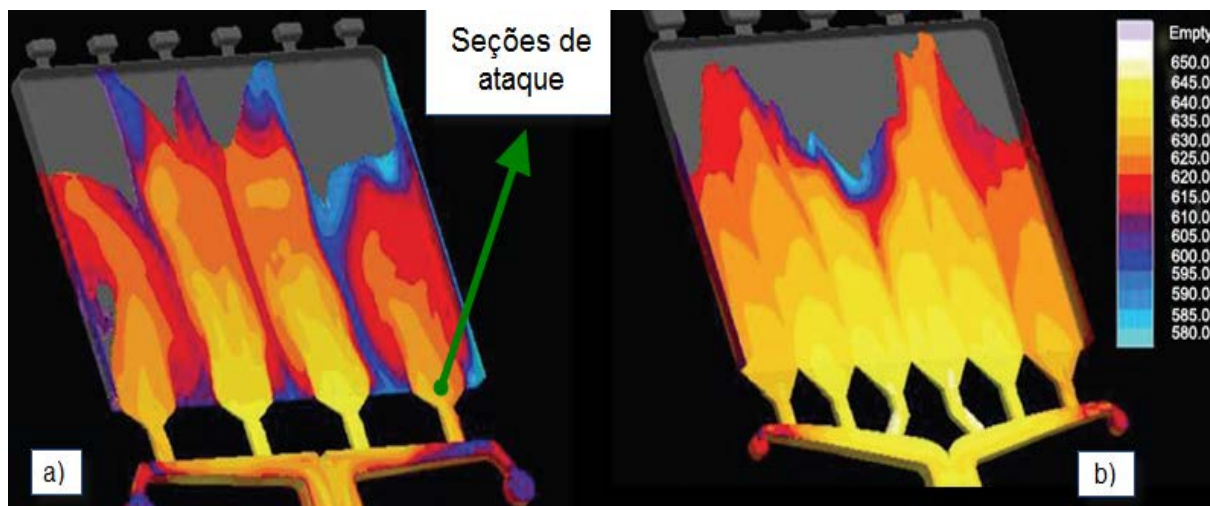
Na figura 10 é apresentado um modelo, onde se têm uma injetora para alumínio e um molde. Sendo que em cinza é representada a bucha de injeção, componente que liga o molde até a injetora, em vermelho é representado o pistão da injetora que tem a função de empurrar o material da injetora até o molde, as placas é a representação do molde, complementado com os pinos extratores e em amarelo é o produto sendo extraído do molde.

FIGURA 10 – Esquema molde e injetora de alumínio *HPDC* (ABAL, 2011).

O processo *HPDC*, é amplamente utilizado na indústria, principalmente quando a necessidade de produção é alta, quando o produto tem geometria complexa e espessura de parede em média de 3mm. No entanto, o processo de injeção sob pressão, pode gerar porosidade, falha podendo ser gerada pelo aprisionamento de ar, consequência derivada da turbulência nos canais de alimentação, ou podendo ser gerada durante solidificação, consequência principalmente pelo excesso de concentração de massa (JIN *et al.*, 2011).

Na figura 11 é apresentado a influencia da seção de ataque no fluxo de injeção, sendo que, na figura 11a o produto é alimentado com quatro seções de ataque resultando em um grande encontro de fluxo dentro da cavidade, já na figura 11b o problema é minimizado ao número de seções de ataque que aumentaram para seis.

FIGURA 11 – Temperatura da liga de alumínio injetada variando com a geometria do canal de alimentação (KIM *et. al.*, 2008)

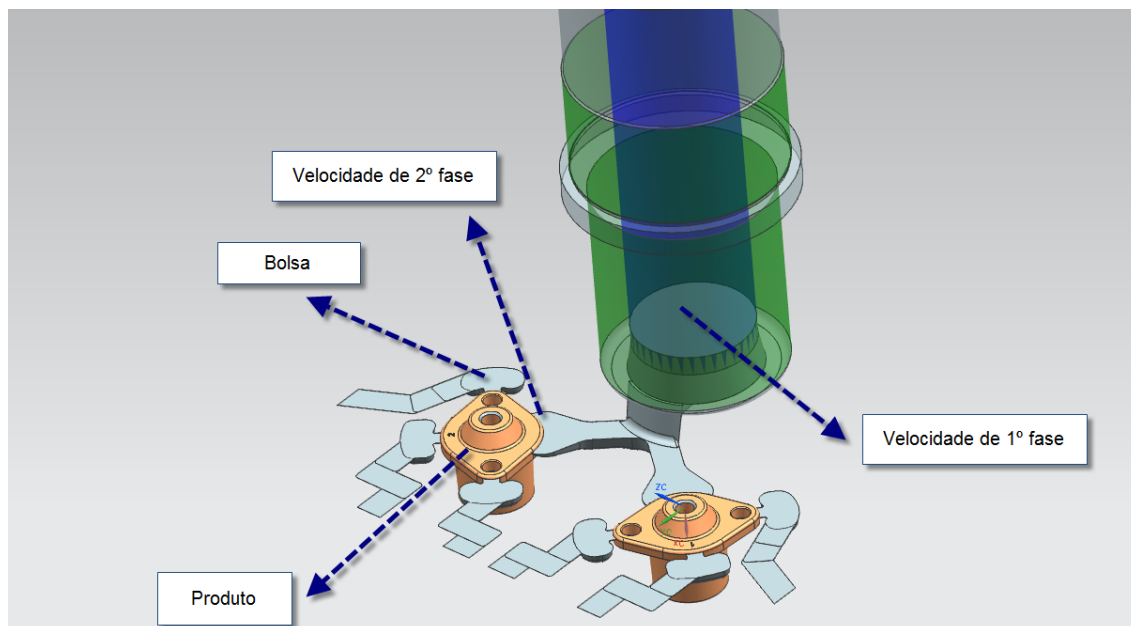


### 2.2.1 Velocidades no processo HPDC

A porosidade pode ocorrer na matriz ao fluxo violento durante a injeção do alumínio durante o processo *HPDC*, derivados da velocidade de primeira e de segunda fase. Diminuindo as respectivas velocidades, aumentando o tempo de injeção e ainda reduzindo a quantidade de ar aprisionado no fluxo de injeção. Porém a redução da velocidade de primeira e de segunda fase poderá aumentar os defeitos de superfície, como por exemplo, a solda fria que é uma falha resultante do encontro de fluxo de injeção (IWATA *et. al.*, 2013).

Na figura 12 é representada a atuação das velocidades de injeção, onde a velocidade de primeira fase é obtida através do pistão de injeção na cor azul, a velocidade de segunda fase é aplicada fase no canal na cor cinza, as bolsas são posicionadas conforme o encontro do fluxo de injeção ou concentração de porosidade resultante na simulação.

FIGURA 12 – Representação das velocidades de injeção (DO AUTOR, 2016).



Foi pesquisada a relação do tamanho e quantidade de poros em função da velocidade de segunda fase, sendo que a porosidade com tamanho de até 0,2 mm ocorreu com frequência nas amostras analisadas, conforme apresentada tabela 1. A quantidade de poros nas amostras diminuiu com a velocidade de segunda fase em 2,8 m/s (Wilczek *et. al.*, 2015).

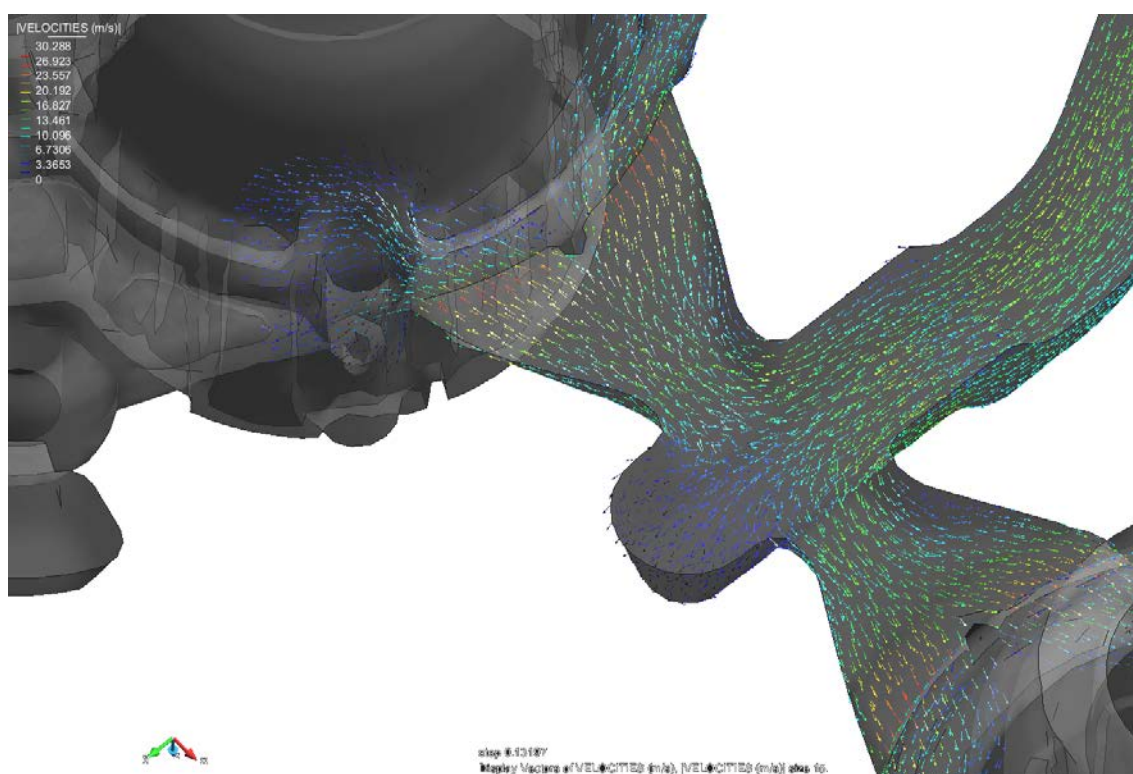
TABELA 1 – Relação do tamanho e quantidade de poros em função da velocidade de segunda fase (Wilczek *et. al.*, 2015).

Tamanho do poro (mm)	Velocidade de segunda fase de fundição (m/s)		
	2,4	2,6	2,8
	Quantidade de poros		
0,00–0,20	543±21	569±134	557±134
0,21–0,40	285±35	217±55	175±58
0,41–0,60	55±8	65±23	39±29
0,61–0,80	39±12	30±15	24±17
0,81–1,00	12±8	11±7	6±8
1,01–1,20	7±3	5±3	4±2
>1,21	11±4	10±6	5±6



Na figura 13, utilizando a simulação computacional, é possível entender o comportamento vetorial das velocidades, além de calcular a velocidade no ataque do produto, através das velocidades iniciais de primeira e segunda fase. Ainda, é possível visualizar, através da representação do vetor, se o fluxo de injeção está com comportamento turbulento ou até mesmo estagnado.

FIGURA 13 – Distribuição vetorial do fluxo de injeção (DO AUTOR, 2016).



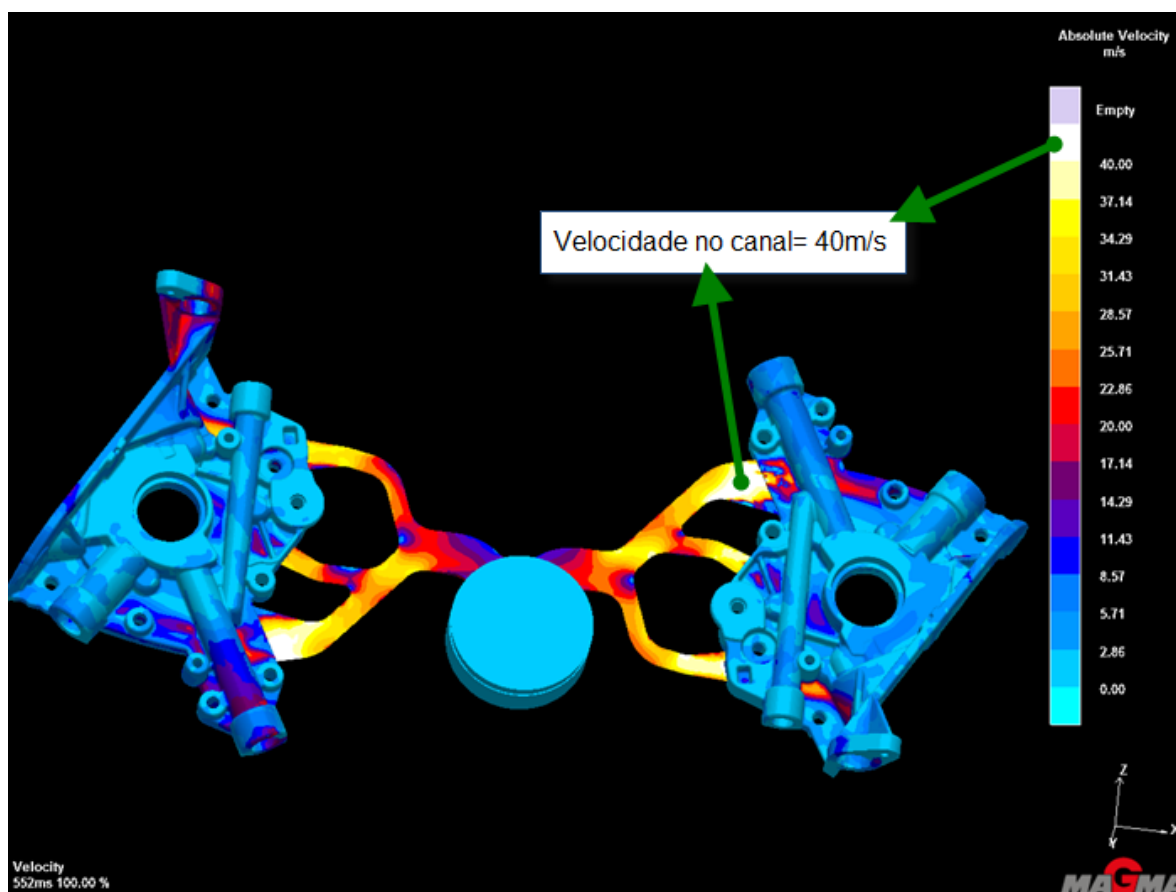
As características do fluxo de injeção de alumínio no processo *HPDC*, durante o preenchimento de uma cavidade, podem ser analisadas analiticamente, experimentalmente e numericamente. Em função das pequenas seções de alimentação, o fluxo de injeção tem um formato planar e veloz. Essas características dependem da velocidade de primeira fase, da velocidade de segunda fase e da velocidade no canal de alimentação (SCHNEIDERBAUER *et. al.*, 2011).

Os parâmetros do processo *HPDC* que afetam a qualidade dos produtos são, a velocidade de primeira fase, a velocidade de segunda fase, a pressão de injeção e o tempo de solidificação. Porém a combinação da velocidade de primeira fase, velocidade de segunda fase e com o tempo de solidificação não possuem uma relação linear com a rugosidade do produto final. Porém a combinação da

velocidade de primeira fase, velocidade de segunda fase e com a pressão de injeção possuem uma relação linear e significativa (KITTUR *et. al.*, 2014).

Na figura 14, é apresentada a distribuição de velocidade no canal de alimentação e no preenchimento da cavidade. A informação auxilia no desenvolvimento do projeto do molde, podendo orientar o projetista na previsão da velocidade mínima e máxima do fluxo de injeção.

FIGURA 14 – Distribuição de velocidade durante o processo de injeção (AUTOR, 2016).

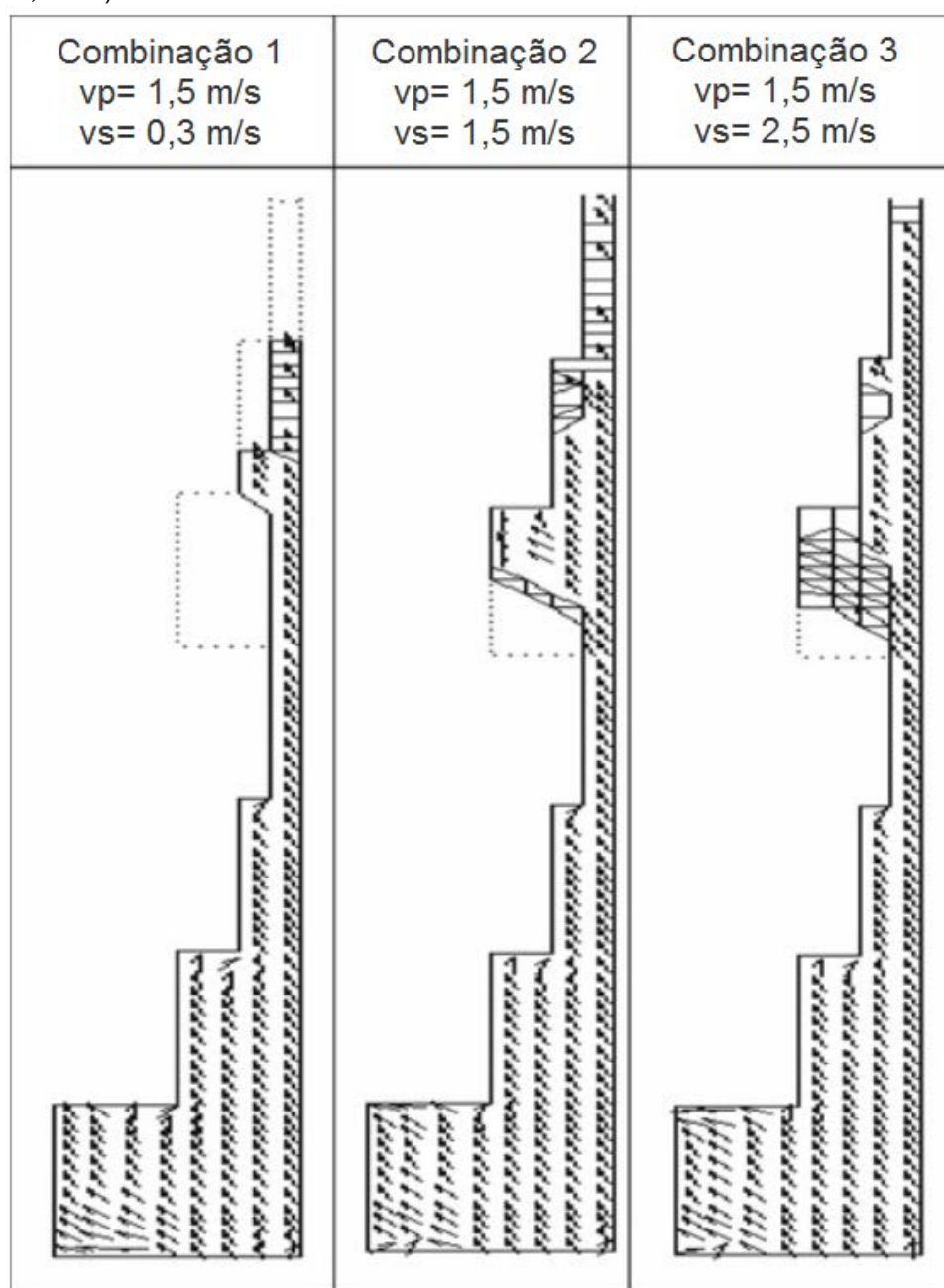


O coeficiente de transferência de calor por convecção entre o alumínio no seu estado líquido com a parede do canal de alimentação da cavidade do molde é uma função crescente da velocidade no canal, que é consequência da velocidade de primeira e da velocidade de segunda fase. Sendo assim o alumínio, se solidifica muito mais rápido no fluxo de injeção, tendendo a aumentar a sua viscosidade e dificultando o preenchimento da cavidade (REIKHER *et. al.*, 2013).

Falhas no processo de injeção de alumínio sob pressão, poderá ocorrer devido à complexidade do fluxo de injeção e variações de espessura no produto.

Além disso, poderá ocorrer variação de pressão hidrostática, resultando em uma distribuição não homogênea da fase líquida, afetando assim as propriedades mecânicas das peças. Controlando a velocidade de primeira fase e de segunda fase poderá minimizar as falhas de preenchimento. Na figura 15 mostra a distribuição dos vetores de velocidade do fluxo para a velocidade de primeira e velocidade de segunda fase para diferentes combinações. A área vazia indica regiões não preenchidas, triângulos e quadrados mostram regiões com falhas de preenchimento devido a velocidades de injeção inadequada (KIMM *et. al.*, 2011).

Figura 15 - Preenchimento variando com a velocidade de primeira fase e velocidade de segunda fase (KIMM *et. al.*, 2011).



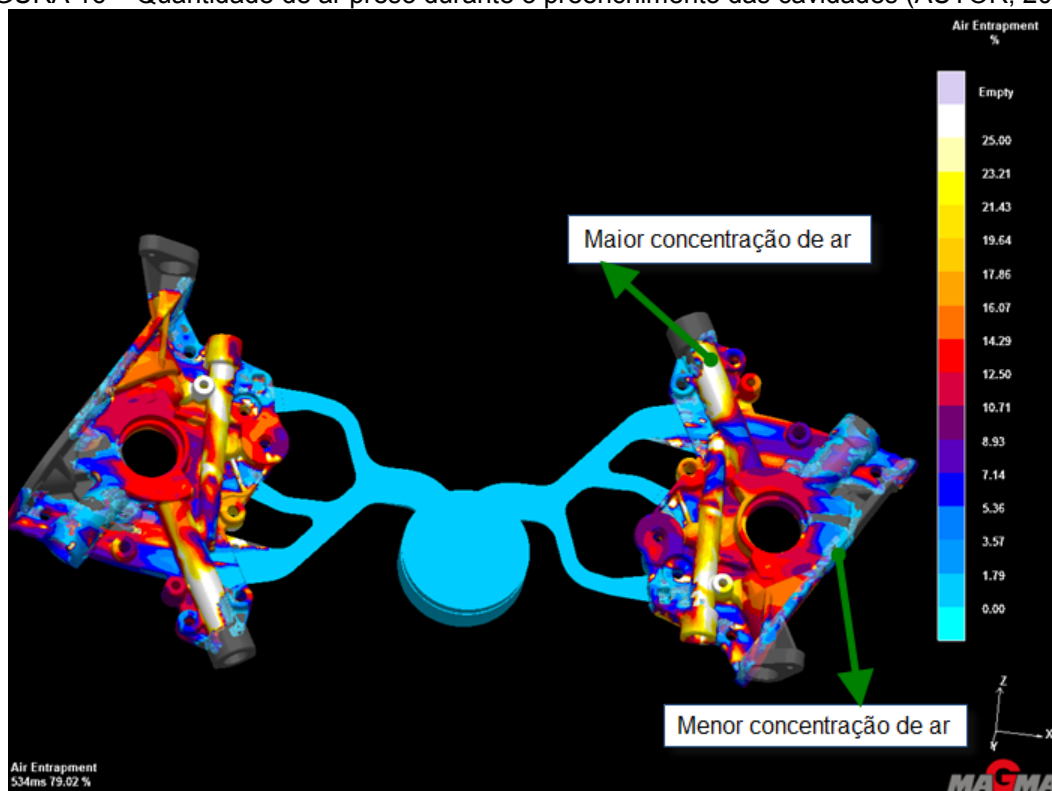
### 2.2.2 Tempo de preenchimento no processo *HPDC*

Para ter bons tempos de preenchimento durante o processo de injeção no processo *HPDC* é necessário ter alta velocidade, porém poderá ocorrer geração de ar preso durante o fluxo de injeção, podendo resultar em porosidade. Se o produto a ser preenchido é muito complexo, o alumínio terá uma tendência de turbulência durante o fluxo de injeção, podendo transportar o ar até a cavidade.

Para evitar o aprisionamento de ar na matriz, sem prejudicar o tempo de preenchimento no processo, devem-se prever durante o projeto do molde, através de simulações computacionais ou através da experiência prática, bolsas e saídas de ar nas localizações mais complexas de preenchimento, principalmente quando há o encontro de fluxo. Por isso, é recomendado realizar simulações preliminares sem bolsas, após verificar onde está o encontro de fluxo, incluem-se as bolsas necessárias.

Na figura 16 é apresentada a distribuição de ar preso de um produto injetado através do processo *HPDC*. É possível verificar que o maior percentual de ar preso encontra-se na região de maior concentração de massa do produto. O fluxo encontra-se a 79% da sua totalidade da análise de fluxo de injeção.

FIGURA 16 – Quantidade de ar preso durante o preenchimento das cavidades (AUTOR, 2016).



### 2.2.3 Tempo de solidificação no processo *HPDC*

As ligas de alumínio puro contraem em média 0,6%, dependendo da composição química, circuito de refrigeração e do processo de injeção. A maneira eficaz para reduzir a porosidade derivada da contração, é através da otimização de massa no desenvolvimento de produto, canal de alimentação bem dimensionado no molde, inclusão de bolsas onde há concentração de massa e encontro de fluxo, podendo diminuir o tempo de solidificação.

Um canal de alimentação para moldes de injeção de alumínio bem projetado, pressuriza o alumínio, gera pouca turbulência e ainda elimina possíveis problemas derivados da contração através da solidificação (WANNARUMON *et. al.*, 2009).

Em muitos casos, a literatura relaciona a origem da porosidade com a refrigeração da matriz. O gradiente de temperatura no conjunto injetado é representado pela diferença de temperatura entre o alumínio e a matriz, podendo refletir na quantidade, localização e, ainda, no percentual de porosidade. A porosidade durante a injeção de alumínio também pode ser causada pela turbulência no canal de alimentação, ou seja, pelo borbulhamento do hidrogênio a partir de uma solução líquida ou pela contração durante a solidificação, muito embora, geralmente, é decorrente da combinação de ambos os efeitos (AMINUL *et al.*, 2011).

As ligas de alumínio podem ser classificadas em dois grupos:

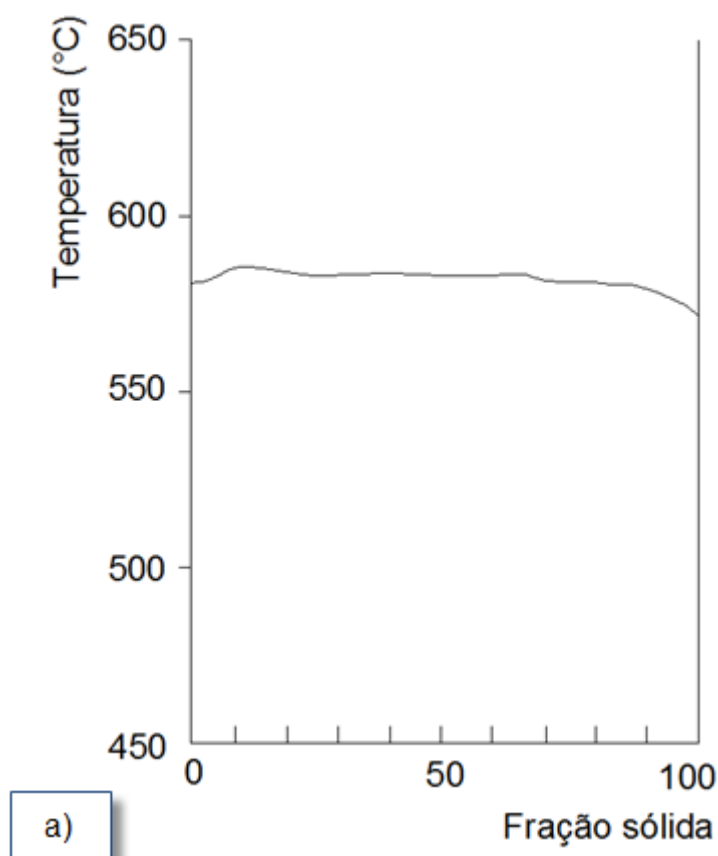
- Liga de longo alcance de refrigeração, a exemplo da liga 380. Essa composição é a mais utilizada no processo *HPDC*.
- Liga de curto alcance de refrigeração, a exemplo da liga 413. Esta é uma liga de alumínio eutética. Isto significa que a fase eutética se forma durante a solidificação.

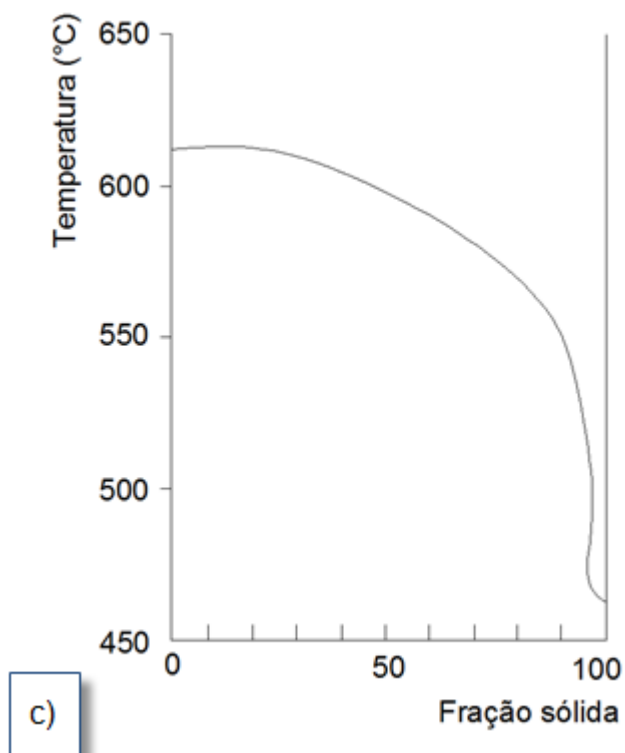
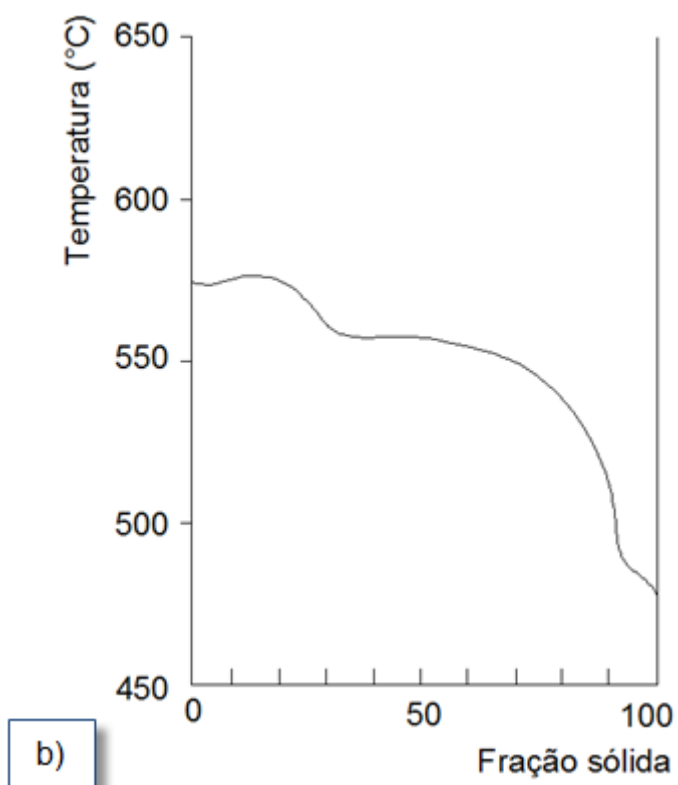
O alumínio injetado em alta pressão durante a sua solidificação poderá formar microporosidade. Em vez da porosidade ficar aprisionada na sua origem, a liga de alumínio poderá deslocar a porosidade para frente da solidificação, conduzindo toda a contração e a porosidade de gás para um local mais central, o

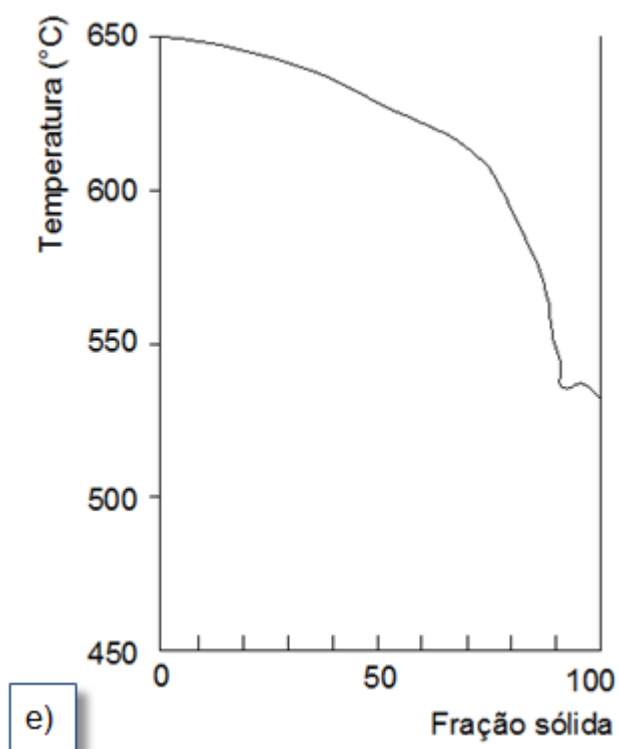
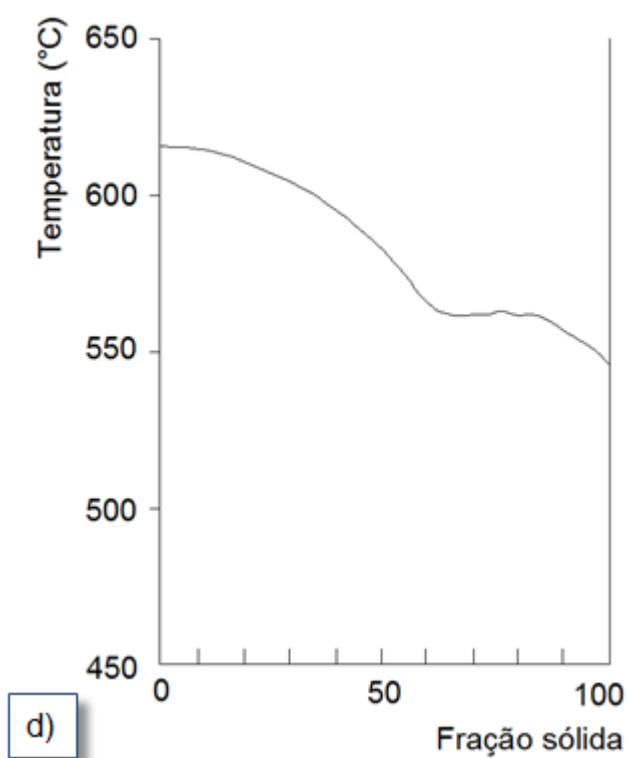
que ressalta a importância da implementação e localização de bolsas (JORSTAD *et al.*, 2007).

Na figura 17 são apresentadas diferentes curvas de resfriamento para cinco diferentes ligas de alumínio, verifica-se que a trajetória da solidificação possui efeito sobre a formação de porosidade, sendo que a fração sólida aumenta com a diminuição da temperatura.

FIGURA 17 – Diferentes tipos de ligas de alumínio e suas respectivas taxas de resfriamento (Jorstad *et al.*, 2008). a) Liga A413, com taxa de resfriamento  $0,7^{\circ}\text{C/s}$ ; b) Liga EU380, com taxa de resfriamento  $0,6^{\circ}\text{C/s}$ ; c) Liga 318, com taxa de resfriamento  $0,4^{\circ}\text{C/s}$ . d) Liga 356, com taxa de resfriamento  $0,7^{\circ}\text{C/s}$ ; e) Liga 206, com taxa de resfriamento  $0,6^{\circ}\text{C/s}$  (JORSTAD *et al.*, 2007).



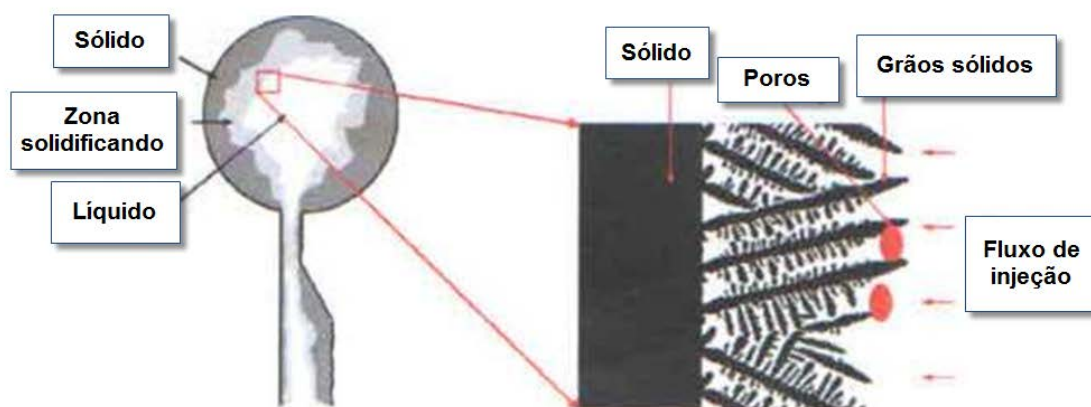






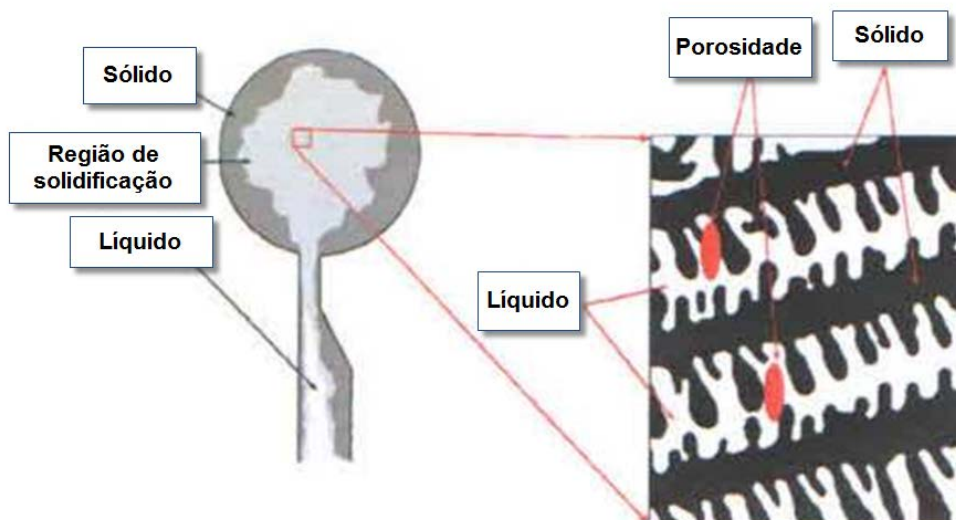
A figura 18 apresenta o processo de solidificação da liga de alumínio, a região fina é perfeitamente alimentada, sendo assim os poros se formarão exatamente na borda do produto, com estabilização no ponto final da solidificação (NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, 2011).

FIGURA 18 – Solidificação da liga de alumínio (NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, 2011).



A figura 19 representa esquematicamente o comportamento do alumínio durante a solidificação, a porosidade está se formando próximo da região que ainda não está sólida, fenômeno este que resulta em maiores poros (NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, 2011).

FIGURA 19 – Esquema do comportamento do alumínio durante o estado de solidificação (NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, 2011).



As propriedades mecânicas de um produto injetado em alumínio através do processo *HPDC* dependem das características presentes no molde de injeção e dos parâmetros de processo. O principal defeito que pode alterar as propriedades mecânicas desejadas é o volumétrico, que ocorre durante o tempo de solidificação. A presença de porosidade gera possíveis concentrações de tensões, comprometendo sua resistência estrutural (DORUM *et.al.*, 2009).

Para moldes onde são verificadas falhas por preenchimento, pode-se reduzir o percentual de porosidade, alterando o tempo de solidificação, transformando a macroporosidade em microporosidade. Essa transição do comportamento da porosidade auxilia diretamente na resistência estrutural do componente injetado, aumentando a densidade do componente, melhorando-se assim as propriedades mecânicas.

Espessuras de parede de produto uniforme podem ajudar no controle da solidificação, isso porque há uma tendência de estabilização na troca térmica do alumínio para o aço da matriz do molde. Paredes de produto uniformes facilitam de forma positiva o controle da contração além de facilitar o fluxo de injeção.

As bolsas podem ser interpretadas como a extensão do produto injetado e são fundamentais para prevenir a porosidade por contração. Na solidificação, recomenda-se sempre aplicá-las no final ou no encontro de fluxo, principalmente em produtos que se exigem múltiplas áreas de alimentação do produto desejado.

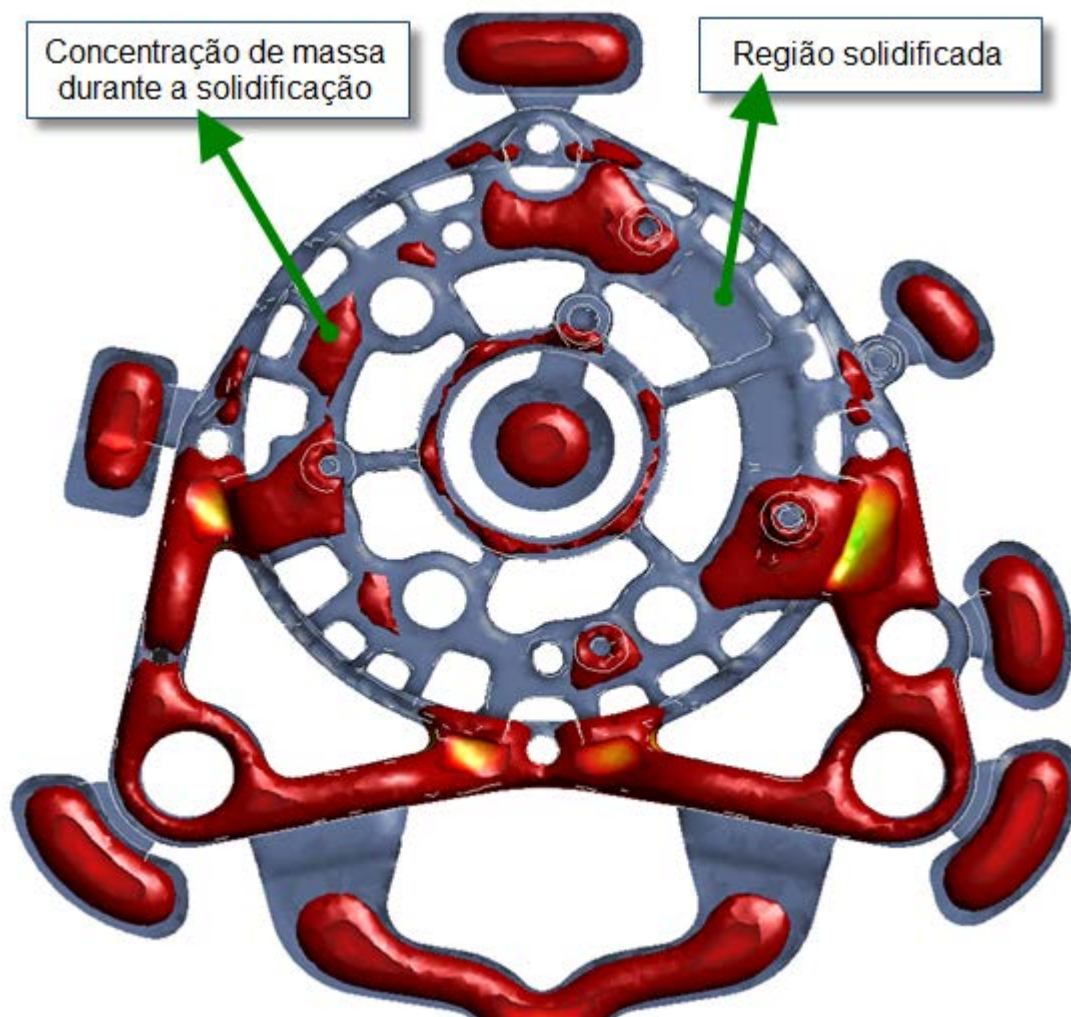
Bolsas com volumes erradas, ou até mesmo mal posicionadas, podem ter função anulada do ponto de vista de processo. Por isso, é interessante e recomendável que durante a realização das simulações em CAE os modelos iniciais não tenham as bolsas. Sem elas, é possível observar na simulação os encontros de fluxo e regiões com possíveis problemas na solidificação.

Na figura 20, através da simulação em CAE, a região cinza é o produto final e a região em vermelho representa o produto solidificando. Assim, é possível entender o comportamento do produto durante solidificação. O fluxo de calor é naturalmente dissipado nas regiões com menores concentrações de massa, os últimos pontos a serem solidificados, possuem uma tendência de geração de porosidade,

Sempre que possível, é recomendada a inclusão de bolsas nas seções do produto com espessuras de parede maiores e nos encontros de fluxo. Nestas seções há probabilidade de se ter porosidade por contração. Na figura 20 pode-se verificar

ainda o comportamento do alumínio solidificando. Esse tipo de simulação é muito importante, pois ela auxilia onde se devem incluir bolsas, bem como onde se devem incluir circuitos para refrigeração.

FIGURA 20 – Simulação do comportamento do alumínio durante a solidificação (AUTOR, 2016).



A porosidade gerada pela contração é definida como falhas volumétricas em produtos injetados em alumínio, os quais surgem devido à mudança volumétrica que ocorre durante a solidificação das ligas. Eliminar este tipo de porosidade é praticamente impossível, mas é possível minimizá-lo através de um bom projeto de molde ou controlá-lo com recursos oferecidos pelo processo de injeção (KIRKMAN, 2006).

A temperatura no núcleo do aço da matriz é muito elevada. Assim, o fluxo de calor tende a se movimentar por condução até a superfície da matriz. Quando esse calor encontra algum fluido com menor temperatura, há uma tendência natural de

ocorrer um choque térmico e, conseqüentemente, a evaporação que pode resultar em poros.

A temperatura inicial do alumínio injetado tem pouca participação quando na indução de porosidade. Em alguns casos a porosidade poderá aumentar, mas em outros, poderá diminuir. Isto tem principalmente correlação com o equilíbrio térmico do conjunto injetado (BREVICK, 2009).

#### 2.2.4 Parâmetros para o processo *HPDC*

Existem parâmetros de processos *HPDC* que podem definir as causas da porosidade. Entre eles, pode-se citar:

- a) O perfil de velocidades no canal de alimentação;
- b) As linhas térmicas e o controle térmico no molde terá importância. A temperatura elevada na matriz e no final do fluxo de injeção pode resultar solidificação direcional;
- c) O *spray* desmoldante tem uma forte relação com a origem de poros. Depende do tempo e da taxa de fluxo de remoção de calor a partir da sua aplicação;
- d) As saídas de ar, do ponto de vista do processo, caso não sejam previstas no projeto, poderá induzir porosidade por ar preso;
- e) A limpeza do pistão da bucha de injeção. Partículas podem alterar o percentual de porosidade, gerando locais de nucleação;
- f) A constituição da liga, dependendo da sua composição química ou até das suas propriedades, como, por exemplo, a viscosidade, poderá ser responsável diretamente pela origem de poros.

No processo *HPDC* é necessário realizar alguns *setup's* da injetora. Essas configurações, também são conhecidas como parâmetros de injeção, são descritas na sequência.

A primeira fase de injeção é a fase onde se define a posição do pistão que se desloca dentro da bucha de injeção. Essa primeira fase é realizada em baixa velocidade para permitir a saída do ar no interior da bucha de injeção e para não

gerar turbulência. A primeira fase é concluída quando todo o volume de alumínio tenha sido eliminado da bucha de injeção. Basicamente, na primeira fase é determinado o curso da velocidade do pistão, sendo que o curso é relativo ao volume de alumínio necessário, ao comprimento da bucha e a taxa de ocupação volumétrica da bucha. A velocidade de primeira fase está relacionada com a porcentagem de enchimento da bucha de injeção durante o deslocamento do pistão, para evitar a turbulência e a formação de ondas durante o fluxo de injeção (MENDES, 2005).

A segunda fase de injeção é o curso restante do pistão, onde o alumínio no estado líquido preenche a matriz. Esta etapa é realizada com maior velocidade imediatamente após o término da primeira fase de injeção. Os parâmetros nesta fase são também o curso e a velocidade, sendo o curso determinado pela resultante do curso total da bucha de injeção, ou seja, é o curso total menos a primeira fase de injeção. Nessa fase, a velocidade depende da espessura das paredes e complexidade do produto a ser injetado (MALAVAZI, 2005).

Na terceira fase de injeção, também conhecida como pressão de recalque, o parâmetro é definido como a pressão exercida pelo pistão de injeção sobre o metal ainda líquido. A pressão de recalque é utilizada após o preenchimento total da cavidade do molde, sendo que o seu objetivo é expulsar o ar preso e, ainda, compensar variação volumétrica durante a contração do metal. A pressão de injeção depende das características desejadas do produto, seja quanto à qualidade da superfície ou quanto ao grau de compactação. Maiores pressões são normalmente aplicadas apenas para produtos com exigências de estanqueidade ou necessidades estruturais específicas. Para aplicar a terceira fase de injeção é necessário que a mesma ocorra imediatamente após o preenchimento da matriz, devendo-se ter o cuidado de observar o possível estágio de solidificação do material. O encontro do alumínio injetado com a matriz em alta temperatura resulta em uma maior viscosidade do alumínio, necessitando assim o aumento da pressão de injeção para se obter o efeito desejado (MALAVAZI, 2005).

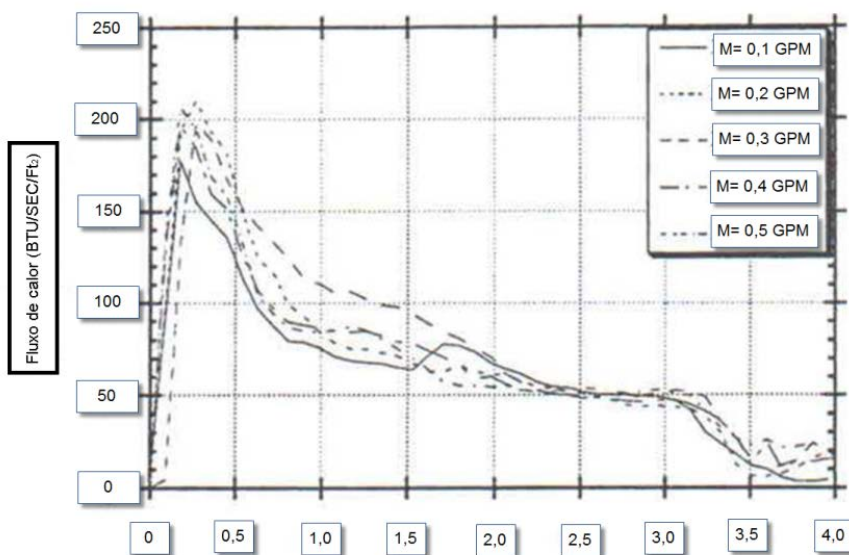
Conhecendo a temperatura da matriz durante o fluxo de injeção, a velocidade do pistão na primeira fase, e a velocidade no canal de alimentação na segunda fase, são os parâmetros que podem auxiliar para entender o comportamento da porosidade no processo *HPDC* (TSOUKALAS, 2008).

O comportamento do fluxo de alumínio dentro da bucha de injeção é outra parte crítica do controle de fluxo. O desenho da propagação também é importante na otimização do fluxo na cavidade do molde. Já nas saídas de ar a partir da cavidade, se forem bem projetadas, as porosidades de ar podem ser reduzidas. Sistemas de vácuo podem ser usados para remover o ar, a partir da cavidade e reduzir ainda mais a porosidade (MILLER, 2010).

Outra variável problemática, e não mensurável em qualquer simulação de injeção, é a quantidade de lubrificante na ponta do pistão da bucha de injeção. O excesso de lubrificante pode ser o responsável por possíveis poros devido à evaporação. Na figura 21 é possível verificar a influência do tempo de aplicação de desmoldantes em relação a quantidade de calor trocado em uma matriz.

Sabe-se que a aplicação de desmoldante ajuda a controlar a possibilidade de porosidade de uma maneira indireta. O fluido desmoldante, como o próprio nome diz, tem como objetivo auxiliar o processo de extração do produto da matriz. Porém, o mesmo poderá ter uma função paralela de isolante térmico (CHU *et. al.*, 1991).

FIGURA 21 – Efeito do spray desmoldante na transferência de calor (Chu *et. al.*, 1991).



Em muitas situações durante o processo *HPDC*, o operador da injetora coloca uma quantidade de spray desmoldante acima do necessário, podendo gerar a porosidade através da evaporação do excesso existente (MONROE, 2009).

A geração da porosidade durante o processo de injeção também é possível, decorrente da interferência humana na dosagem de desmoldante, muitas fundições de alumínio optaram em investir e automatizar esse processo. Desta forma, não apenas se reduz a probabilidade de porosidade, mas também se economiza no desmoldante aplicado. Aplicando-se o desmoldante de forma automatizada e constante na matriz, diminuem-se os riscos de acidente de trabalho, já que na aplicação manual é necessário que o operador fique entre as placas fixas e móveis do molde de injeção.

### 2.3 SIMULAÇÃO APLICADA AO PROCESSO *HPDC*

A previsão da porosidade em produtos injetados em alumínio, com aplicação específica para o processo *HPDC*, tem sido uma meta para empresas que desenvolvem softwares com a plataforma através do método dos elementos finitos. A complexibilidade da matemática envolvida e a inovação do assunto com aplicação do CAE específica para o processo potencializa o desafio (JORSTAD *et al.*, 2008).

As simulações através do método dos elementos finitos, também, podem ser utilizadas tanto para análise de fluxo de injeção ou para análise do comportamento durante a solidificação. Ambos os resultados são necessários para entender o comportamento de porosidade em produtos injetados através do processo *HPDC*, seja porosidade derivada do ar preso ou da contração. O comportamento do fluxo de injeção de alumínio em matrizes pode ser representado pelo aprisionamento do ar, ou pelo gradiente de temperatura durante a solidificação, ambos são conhecidos por determinar o comportamento da porosidade em produtos injetados em alumínio (IRFAN *et al.*, 2010).

Na figura 22, é apresentada a distribuição de temperatura durante o fluxo de injeção de uma cavidade de uma matriz de um molde para injeção de alumínio através do processo *HPDC*. O modelo foi simulado com auxílio de software de CAE Click2Cast.



FIGURA 22 - Gradiente de temperatura durante o preenchimento (AUTOR, 2016).



Resultados do pós-processamento derivadas das simulações com tecnologia CAE, com foco na análise de fluxo e solidificação auxiliam para o entendimento do comportamento da porosidade com confiabilidade quando comparado a análises empíricas (SHOLAPURWALLA *et al.*, 2010).

O gradiente de temperatura apresentado através da simulação, depende da perda de calor dissipada durante o fluxo de injeção, ou seja, quanto maior o canal, maior será a perda de calor, além da complexidade do produto simulado.

A variação de espessura na geometria do produto desejado maximiza o potencial de diferenças de temperaturas. O resultado apresentado no pós-processamento é uma ferramenta com grande potencial orientativo ao projetista do molde, possibilitando que no projeto, se refrigere com mais eficiência regiões com maior concentração de calor, ou aqueça regiões com grandes perdas térmicas, com o objetivo de se estabilizar a temperatura da matriz. A estabilidade térmica na matriz é importante para vida da matriz do molde, bem como para a homogeneidade das propriedades mecânicas e estabilidade dimensional do produto desejado.



A simulação computacional via elementos finitos é amplamente utilizada em vários segmentos da engenharia de uma forma geral, seja para aplicações com ênfase em resistência dos materiais ou para aplicações de mecânica dos fluídos. Para aplicações específicas, como ao do processo *HPDC*, a simulação é importante em função da alta complexidade da geometria do modelo a ser avaliado, bem como as múltiplas condições de contorno que o processo oferece.

Atualmente, há uma grande quantidade de métodos aproximados com auxílios computacionais, os quais utilizam a substituição da estrutura original de geometria complexa, com uma infinidade de graus de liberdade por uma estrutura mais simples que tenha apenas um número finito de graus de liberdade, ou seja, é possível criar uma boa simplificação das condições de contorno.

Ainda, Zienkiewicz *et al.*, (2000), cita um tipo de simulação pode ser executada através de uma hipótese, de que a deformação de uma estrutura real pode ser aproximada pela superposição de um conjunto de curvas de forma definida. Porém, a amplitude não é especificada, e essas amplitudes das curvas são as que simbolizam as coordenadas generalizadas de um sistema simples.

Kleiber *et al.*, (1992), exemplificam que no Método de Rayleigh-Ritz a escolha de uma função para um deslocamento é feita de forma a considerar fielmente as condições de contorno de um modelo físico e, em seguida, é realizada a sua substituição na equação da energia potencial do modelo estudado.

Segundo Uddanwadiker *et al.* (2007), os passos básicos para uma simulação via elementos finitos são o pré-processamento, processamento e pós-processamento. No pré-processamento é necessário um modelo geométrico, normalmente produzido em CAD 2D ou CAD 3D, sendo que, quanto melhor a qualidade do modelo, maior será a confiabilidade dos resultados. Ainda neste passo, a complexidade de um modelo geométrico necessita de uma maior quantidade de elementos a serem aplicados. Isto ocorre porque existe ainda a configuração e a alimentação de dados como as propriedades físicas e mecânicas do material, os quais são muito importantes para se obter confiabilidade dos resultados. Pode-se chamar de etapa final do pré-processamento a entrada das condições de contorno físicas, quais sejam: forças, pressões, acelerações, massas e temperaturas. Ainda, são somadas com as restrições de deslocamento, aplicadas aos nós especificados, conforme o modelo. Durante o processamento, o software resolverá um conjunto de equações de engenharia de forma simultânea, podendo ser composto com grande

quantidade de variáveis para alcançar o resultado desejado. O pós-processamento determina a apresentação gráfica dos resultados da simulação dos elementos finitos que normalmente, é representada através de gradiente de cores ou gráficos que mostram o comportamento da geometria simulada.

Simulações podem ser executadas com simplificações através da subdivisão da geometria do modelo a ser analisado, podendo ser representadas por elementos tetraédricos ou cúbicos. O método mais importante e utilizado de aproximações pela divisão de uma estrutura é o método dos elementos finitos, onde a estrutura pode ser dividida em elementos, podendo ser refinadas e conectadas por nós.

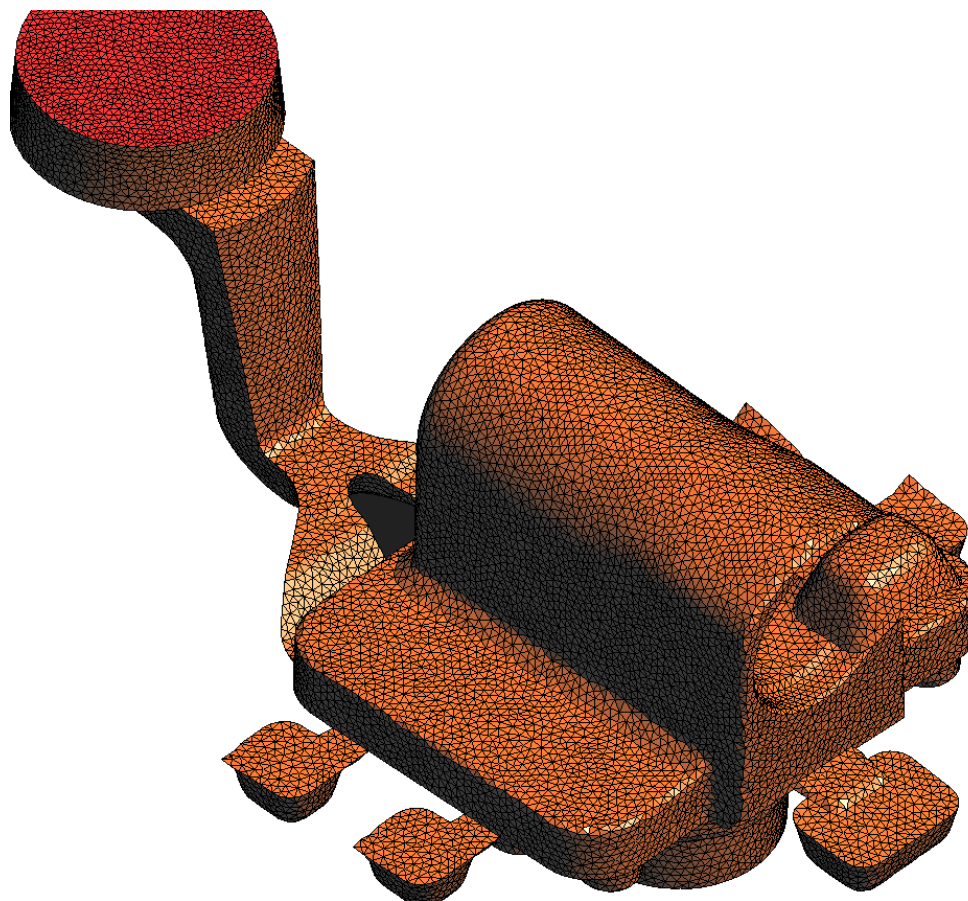
Uma análise executada através do método dos elementos finitos é processada a partir dos deslocamentos dos nós e esse é o modelo mais confiável e também o mais utilizado matematicamente. O conceito aplica o princípio da estabilização da energia potencial.

Um problema físico quando simulado pode ser resolvido através de equações correspondentes aos deslocamentos dos nós conhecidos, sendo que para a resolução se pode ter de forma geral dois tipos de métodos numéricos: os diretos e os iterativos.

O método dos elementos finitos é definido como o método numérico que tem a capacidade de resolver equações através de aproximações, solucionando equações que representam um comportamento físico. Sua representação geométrica é construída a partir de um modelo de elementos ou de nós, sendo que seus vários tipos de elementos podem ser aplicados conforme a complexidade do modelo a ser simulado (CAMARÃO, 1994).

Na figura 23 é apresentado um exemplo de aplicação dos elementos e, como a geometria a ser analisada é complexa, foi determinada a aplicação de elementos tetraédricos.

FIGURA 23 – Aplicação dos elementos tetraédricos, condição de contorno de pré-processamento (AUTOR, 2016).



Segundo Ugural (1981) e Conte *et al.* (1980), os métodos diretos são mais confiáveis, pois geram a solução exata, ou seja, com menos erros de arredondamento em um número finito de operações aritméticas. É importante destacar que na maior parte das aplicações em problemas lineares de engenharia são utilizadas as técnicas diretas.

Conte *et al.* (1980), ressaltam que os métodos iterativos fornecem uma sequência de soluções aproximadas, as quais normalmente acabam convergindo para a solução exata. Essa metodologia é muito utilizada quando um número de iterações tende para o infinito, a exemplo dos problemas de engenharia de grande complexidade, problemas que podem ser lineares ou não-lineares.

Simulações através do método dos elementos finitos, podem ser aplicadas para análise de fluxo, solidificação e estrutural para investigar falhas em produtos injetados em alumínio. Estudos mostraram que para a liga AlSi9Cu3 (Fe) a

porosidade foi a principal causa da falha, evidenciado pela iniciação e propagação de fissuras de poros individuais. Imagens volumétricas de amostras de porosidade interna do estado inicial foram usadas como entrada para a simulação de elementos finitos do comportamento mecânico do material para uma tensão uniaxial. O MEF, juntamente com a avaliação morfológica dos poros, permitiu investigar as correlações entre os parâmetros geométricos, concentração de tensões e início da trinca. Os dados foram analisados de acordo com abordagens complementares que incidem tanto sobre os poros individuais ou sua densidade local (VANDERESSE *et al.*, 2011).

O software comercial Magma CAE, desenvolvido para aplicação específica ao processo *HPDC*, utiliza o método dos elementos finitos como base de cálculo para resolver problemas de fluxo e de solidificação, processo complexo e composto por muitas variáveis. É uma ferramenta eficiente, para simular o comportamento do fluxo de injeção e a solidificação do produto no molde, além de ser confiável para apresentar resultados bem variados, como por exemplo, fluxo de injeção, distribuição de velocidades, tempo de preenchimento, aprisionamento de ar, tempo de solidificação e verificação de excessos de concentração de massa (WANNARUMON *et.al.*, 2009).

A figura 24 apresenta uma visão geral de como é a área de trabalho do software Magma, já na figura 25 é mostrada a área de trabalho do software Click2Cast, sendo que ambos são específicos para simulações para o processo *HPDC*. Na figura 26 é apresentado a área de trabalho do software Jump com aplicação específica para dados estatísticos e desenvolvimento de equações.

FIGURA 24 – Área de trabalho do software Magma (AUTOR, 2016).

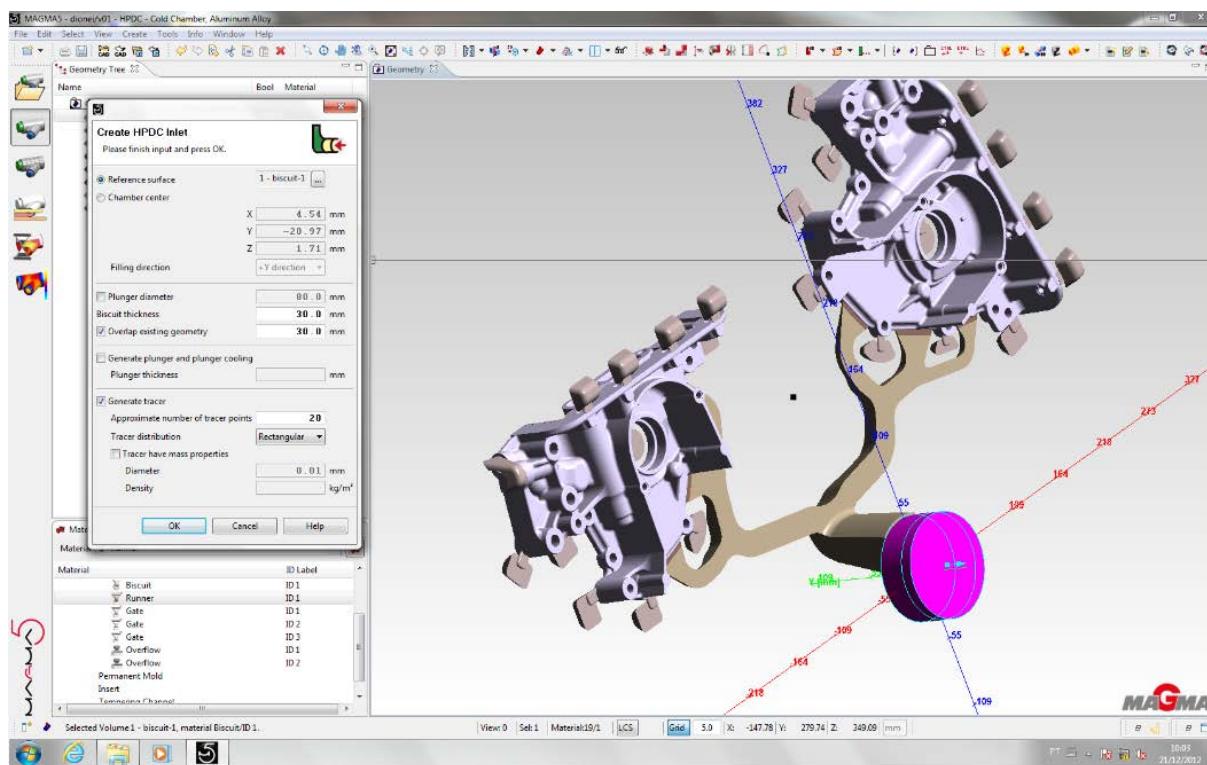


FIGURA 25 – Área de trabalho do software Click2Cast (AUTOR, 2016).

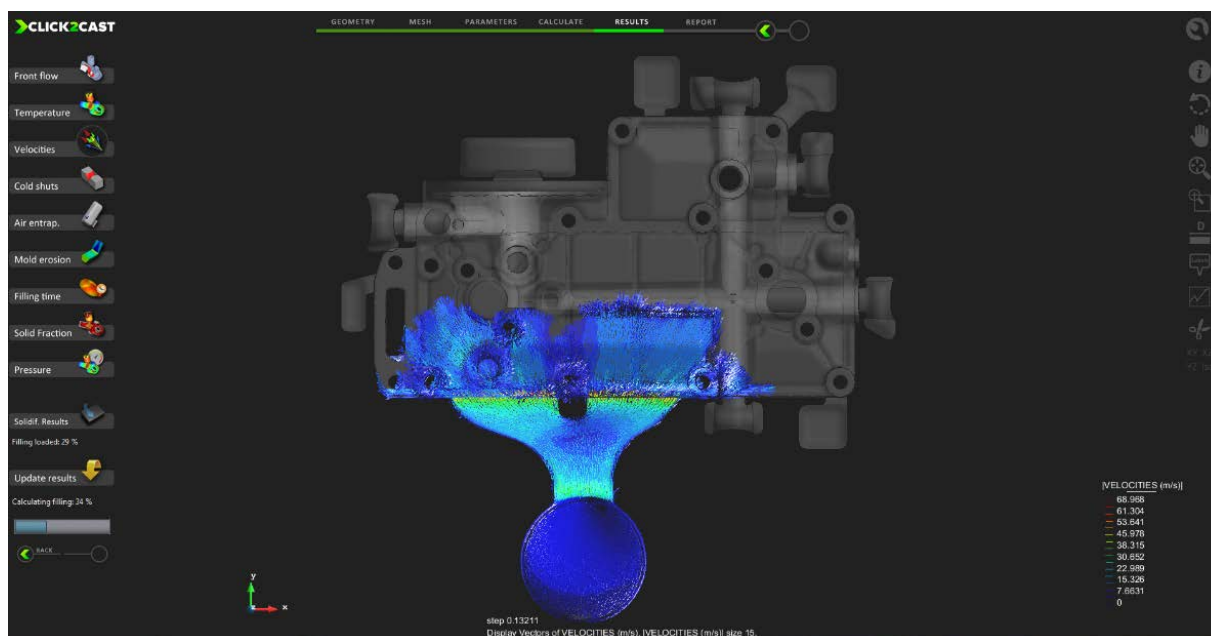
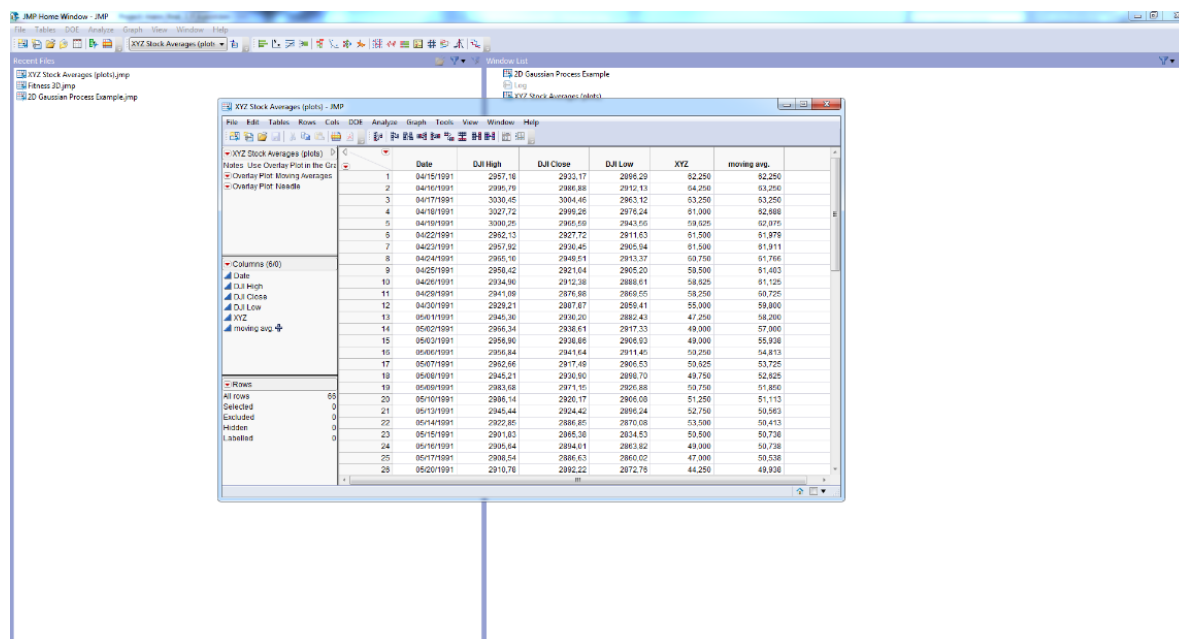


FIGURA 26 – Área de trabalho do software Jump (AUTOR, 2016).

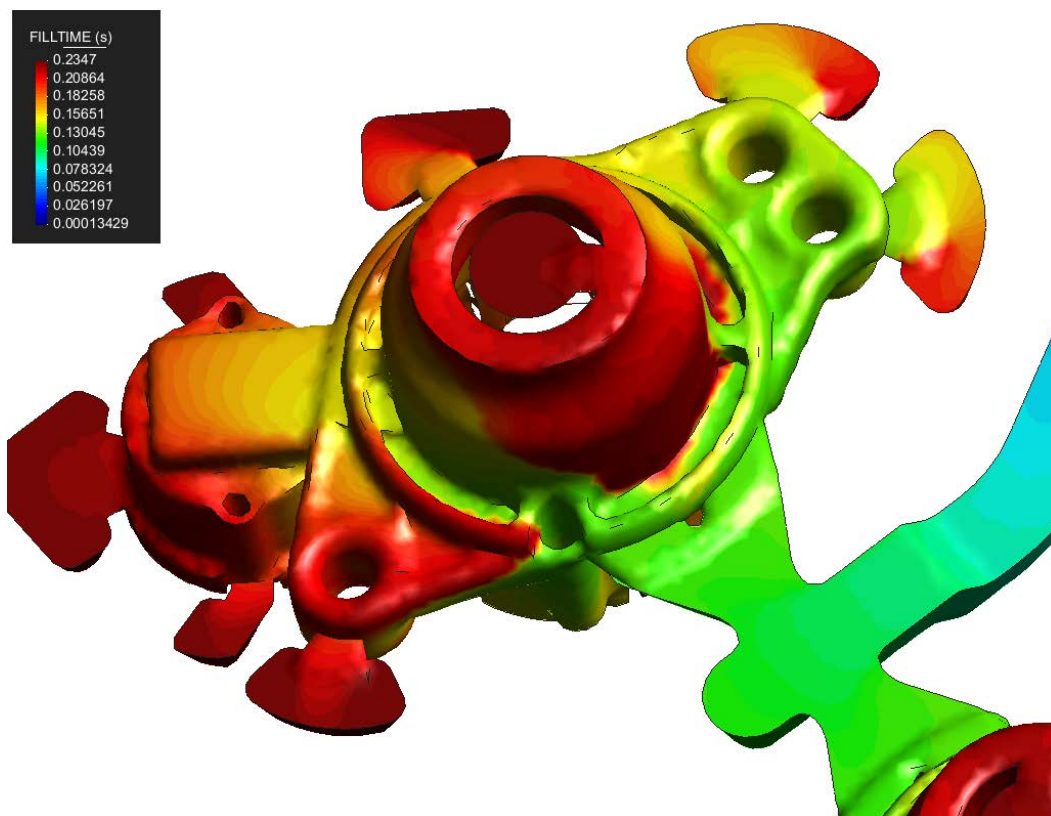


As informações necessárias para a simulação com aplicação específica ao processo *HPDC*, seja para análise de fluxo ou para estudar o comportamento durante a solidificação, é composto por várias condições de contorno, que são representadas matematicamente como variáveis do processo de injeção. Consequentemente, quanto maior a quantidade e a qualidade dos dados de entrada, maior será a confiabilidade dos resultados que poderão ser analisados no pós-processamento.

Simulações computacionais para análise de fluxo em canais de alimentação para o processo *HPDC* e para análise da solidificação consistem basicamente na importação do modelo geométrico, aplicação da malha, definição da liga a ser injetada, velocidade de primeira fase, velocidade de segunda fase e a temperatura média da matriz.

Na figura 27 é apresentada o resultado de uma simulação, onde é possível verificar o tempo de preenchimento da matriz em função do fluxo de injeção. Através da legenda, verifica-se que inicialmente o alumínio preenche o canal de forma constante e quando chega ao produto, o tempo está variando em função das espessuras de parede e da distância que o fluxo terá que percorrer até chegar às bolsas, último estágio de preenchimento.

FIGURA 27 – Simulação da distribuição de tempo de injeção (AUTOR, 2016).



A simulação numérica, com aplicação específica para o processo *HPDC*, é considerada uma ferramenta poderosa para simular as seguintes variáveis:

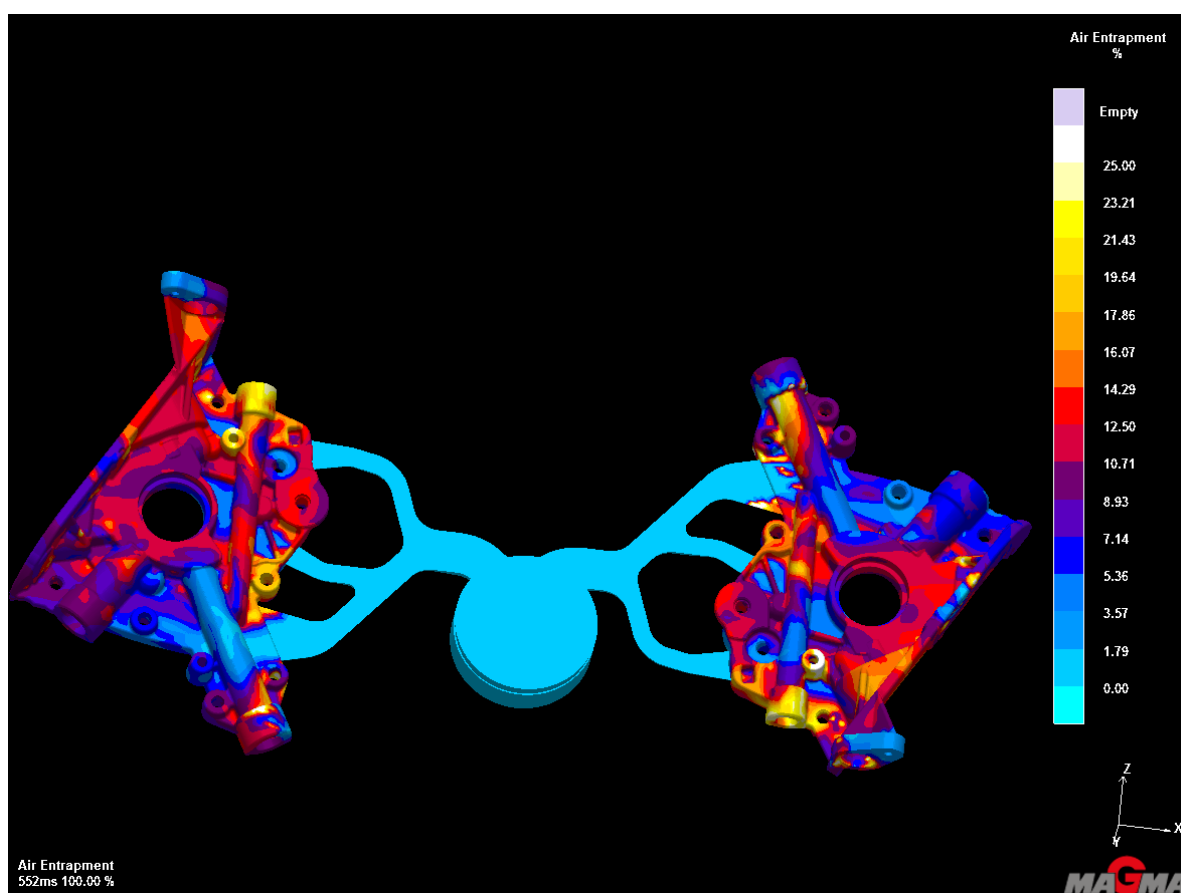
- Tempo de preenchimento;
- Distribuição da velocidade;
- Distribuição de temperatura no preenchimento;
- Tempo de solidificação;
- Concentração de massa durante a solidificação;
- Volume de porosidade;

Resultados apresentados a partir das simulações permitem um melhor entendimento do comportamento dos mecanismos, e gerações de defeitos do processo *HPDC*. Para melhor entender os defeitos, é importante possuir condições de contorno confiáveis, visando qualidade do processo e redução de custos evitando o retrabalho (WANNARUMON *et. al.*, 2009).



Na figura 28 é mostrado, através da simulação executada pelo autor, o canal mostrado na figura 16, porém devidamente corrigida, através do ajuste do canal de alimentação. É importante verificar, que a correção na geometria do canal de alimentação resultou em um menor percentual de aprisionamento de ar, dado este que poderá influenciar no percentual de porosidade no produto.

FIGURA 28 – Preenchimento completo (AUTOR, 2016).



Através de recursos computacionais, valores de pressão de ar e a densidade podem ser utilizadas como dados de pré-processamento para a simulação. A porosidade derivada do aprisionamento do ar foi pesquisada através de um conjunto de informações, sendo que 80% dos dados eram derivadas de simulações e 20% dos dados eram derivados das amostras para validação dos resultados (NOORUDDIN *et. al.*, 2014).

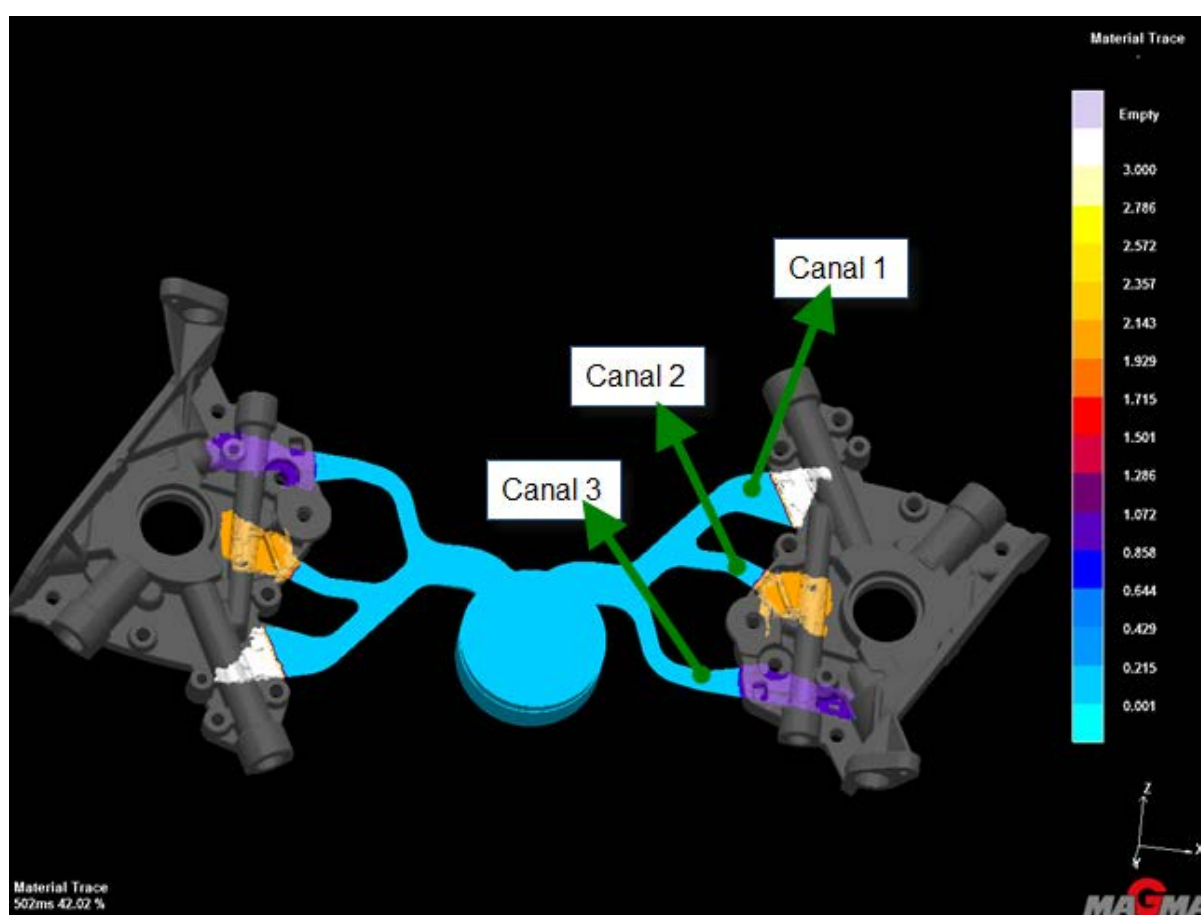
O controle do fluxo de injeção de alumínio durante o processo, também pode ser utilizado para minimizar a porosidade. Se todo o sistema de alimentação,



incluindo produto, canal e bolsas forem preenchidos muito rápidos, o excesso de velocidade poderá resultar em um percentual de ar preso elevado.

Na figura 29 demonstra-se o comportamento do fluxo de injeção em forma de cores, separado por canais secundários e por áreas de alimentação. Observa-se através do canal 1, representado pela cor branca, que quanto maior for a área de ataque no produto, maior será a vazão de alimentação resultante. Cada ataque é responsável no preenchimento de um determinado volume e, por isso, os canais apresentam geometrias de áreas diferentes. A imagem capturada corresponde a 42% da sua totalidade.

FIGURA 29 – Comportamento das áreas de alimentação (AUTOR, 2016).

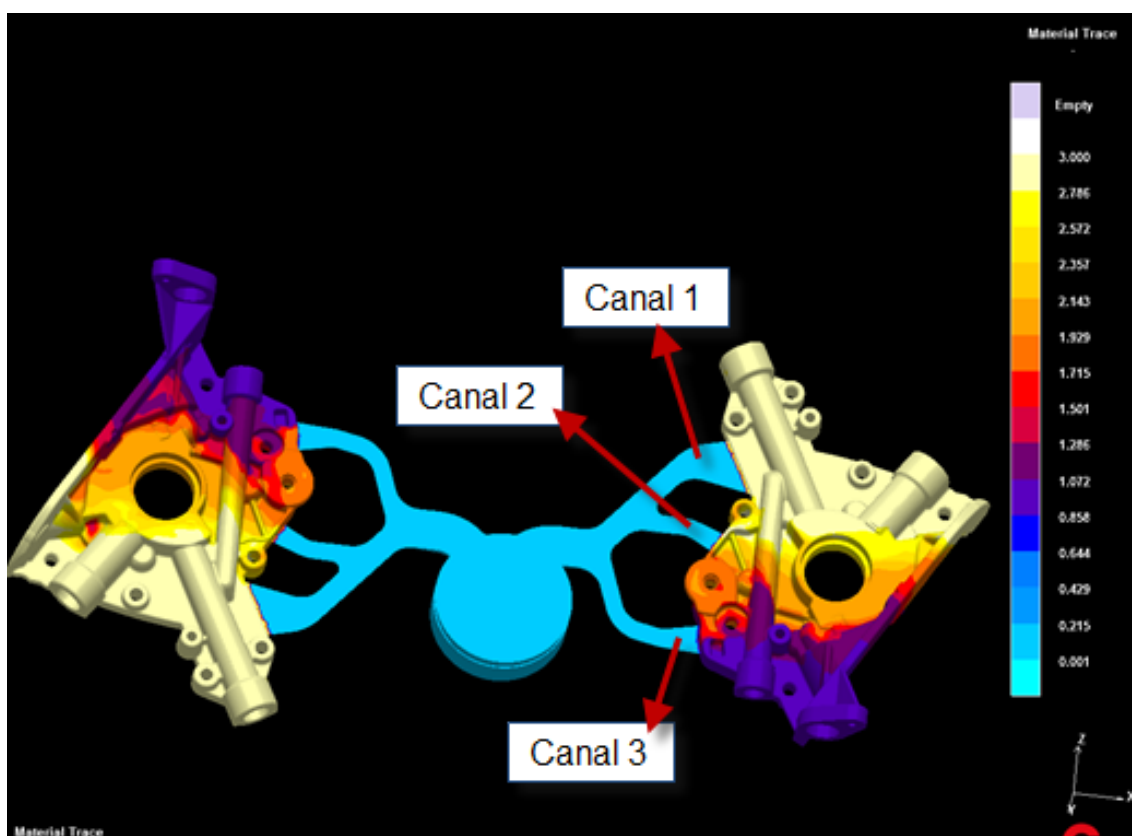


Em simulações para análise de fluxo, é importante estudar o comportamento do fluxo de injeção, turbulência, velocidades e aprisionamento de ar. Ainda, é possível verificar, através de cores, como se comporta cada seção de ataque no produto.

Geralmente, os poros gerados no fluxo de injeção ocorrem em função de uma provável instabilidade de fluxo de injeção, ou seja, uma turbulência derivada por excesso de velocidade e alterações bruscas de trajetórias. Por outro lado, se todo o sistema de alimentação for preenchido de forma mais lenta, ocorrerá perda de calor entre o fluxo e a superfície do aço da matriz, e a rápida perda de calor do alumínio resultará em um aumento de viscosidade da liga, dificultando no escoamento do fluxo e aumentando diretamente a perda de carga do canal, pela ocorrência de um aumento significativo das forças viscosas do fluxo. Portanto o canal de alimentação poderá pontencializar a porosidade, tanto pela baixa, como pela alta velocidade.

Na figura 30, através de uma representação gráfica, a simulação permite o entendimento do comportamento do fluxo de injeção, separado pelos canais de alimentação 1, 2 e 3. É possível verificar que o fluxo do canal 1, representado pela cor bege no produto, possui uma área maior de alimentação em função da sua área de preenchimento no canal ser maior. O mesmo comportamento é válido para o canal 2, representado pela cor amarela e para o canal 3, representado pela cor azul. Outras cores estão representando os respectivos encontros de fluxos entre os canais 1, 2 e 3.

FIGURA 30 – Comportamento do fluxo de injeção (do Autor, 2016).



## 2.4 PRESSÃO DE INJEÇÃO NO PROCESSO HPDC

Durante o processo de injeção sob pressão, as variáveis como a pressão de injeção, baixa taxa de ocupação volumétrica da bucha de injeção, excesso de desmoldantes e lubrificantes em moldes também podem contribuir para a formação de porosidade em produtos obtidos através do processo HPDC (PROSKE *et. al.*, 2009).

Sabe-se que o aumento da pressão de injeção durante o processo pode representar uma grande influência no aparecimento de porosidade em produtos injetados através do processo HPDC, sendo que isto pode ser uma combinação de porosidade por contração, mais a porosidade por aprisionamento de ar. No processo de injeção, o aumento da pressão também permite uma maior eficiência do escoamento do fluxo de alimentação através do canal. No entanto, a intensificação da pressão não pode eliminar a porosidade, apenas a reduz (SHOLAPURWALLA *et. al.*, 2010).

A probabilidade de surgimento da porosidade diminui com a intensificação da pressão de injeção. Entretanto, poderá aumentar com velocidades excessivas durante o fluxo de injeção já no canal de alimentação, aumentando a probabilidade de turbulência no escoamento. A baixa taxa de ocupação volumétrica na bucha de injeção e mudanças bruscas de geometria de canal de alimentação também podem gerar possíveis turbulências. Se estes parâmetros não forem controlados adequadamente, poros poderão ser gerados (CAMPATELLI *et al.*, 2011).

Em muitas situações, onde há a presença de poros devido ao fluxo de injeção, acredita-se que o ar preso pode ser eliminado com intensificação da pressão de injeção e com a inclusão de saídas de ar. Para isso, pode-se utilizar o modelo matemático da equação do gás ideal ( $PV=nRT$ ), há simplificações desta lei, como lei de Charles e Lei de Boyle. A lei de Charles relaciona o volume de poro em função dos gradientes de temperatura no metal e a lei de Boyle liga mudanças na pressão para a variação do volume de poros. Quando Boyle é igual a zero, a aplicação da lei resultaria em um volume de poros infinito. Se o volume de poros tende ao infinito, a porosidade vai preencher todo o restante do volume do alumínio que sofreu a contração (HERMAN *et al.*, 2007).

Cálculos semelhantes podem ser realizados assumindo substâncias de evaporação na matriz do molde. Sabe-se que pressão de injeção no processo HPDC

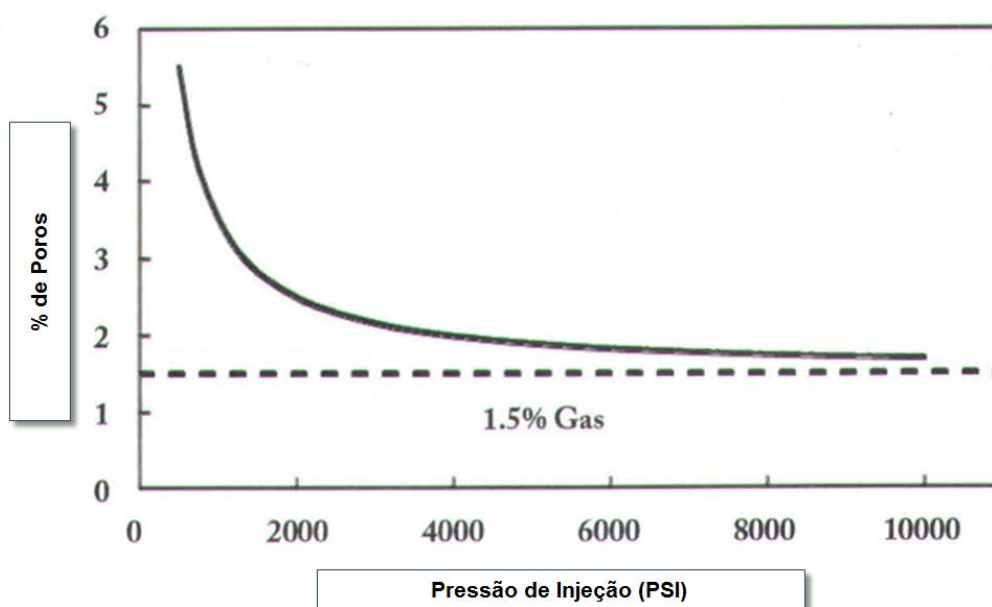
cai rapidamente e, caso haja a solidificação do ataque, esse comportamento é possível de ser verificado durante a operação da injetora, através de análise de amostras.

Para ser injetado, o alumínio deve ser forçado com o emprego da pressão de injeção. Tal pressão permite que o alumínio, ainda no estado líquido, se molde conforme a geometria da matriz. A qualidade de um produto injetado em alumínio através do processo *HPDC* é afetada pela relação preenchimento das cavidades da matriz versus solidificação. Sendo assim, a quantidade de injeção aplicada é fundamental para a produção de produtos em alumínio (CAMPATELLI *et al.*, 2011).

A pressão de injeção, que dependendo do produto a ser obtido varia entre 60 a 100 MPa, pressões erradas podem induzir ao aprisionamento de ar, resultando em porosidade no produto final (ROBBINS, 2012).

A tendência é que ocorra a redução de porosidade com o aumento da pressão de injeção. Brevick e Mobley (2001) sugerem a relação percentual de porosidade com a intensificação da pressão de injeção. Esta relação está representada na figura 31. Para esta figura, a presença de poros é cerca de 1,5% de porosidade em função do gás presente na matriz. Para pressões de injeção com intervalo de 6,000-7,000 PSI a 10.000 PSI, a porosidade diminui, mostrando que de fato existe uma relação inversa entre porosidade e a pressão de injeção.

FIGURA 31 – Fração de porosidade teórica como uma função de intensificação da pressão de injeção (BREVICK *et. al.*, 2001).

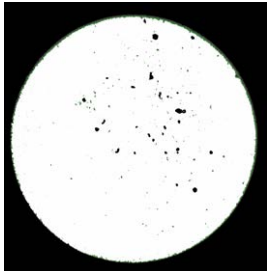
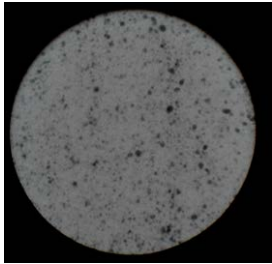


## 2.5 AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE POROSIDADE

Verificou-se que as ligas de alumínio injetadas através do processo *HPDC*, muitas vezes apresentam defeitos considerados microestruturais, resultantes do processo de fundição, tais como a porosidade, os óxidos metálicos e de inclusões. A fractografia, medição de densidade, radiografia e metalografia têm sido as principais técnicas para a identificação e classificação da porosidade das amostras injetadas em alumínio. Como essas técnicas são espacialmente limitadas, modelos estatísticos são necessários para determinar o volume real de poros. Análises utilizando raio X, está sendo cada vez mais utilizado, devido à sua capacidade de fornecer informações rápidas e precisas sobre a presença da porosidade. (VANDERESSE *et al.*, 2011).

As tabelas 2 a 4 apresentam o grau de classificação na inspeção por fluoroscopia, segundo a norma ASTM E 505, sendo que as espessuras de parede se referem às espessuras das paredes do produto antes do processo de usinagem. Sendo que a tabela 2 corresponde ao somatório das tabelas 3 e 4.

TABELA 2 - Classificação de poros (ASTM E 505).

Poros para paredes até 9,5mm quando em bruto	
	<p><b>Grau 1</b></p> <p>Poros isolado, menor ou igual à Ø 0,7mm.</p> <p>Poros Múltiplos, menor que Ø 0,6mm com distância entre poros de 1,0mm</p>
	<p><b>Grau 2</b></p> <p>Poros isolado, menor ou igual à Ø 1,5mm.</p> <p>Poros Múltiplos, menor que Ø 1,0mm com distância entre poros de 1,5mm.</p>

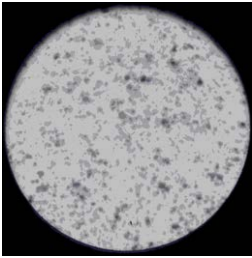
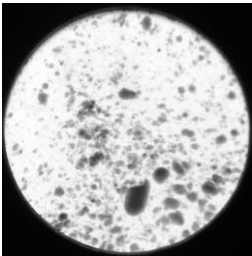
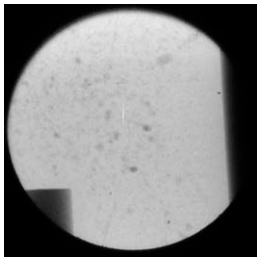
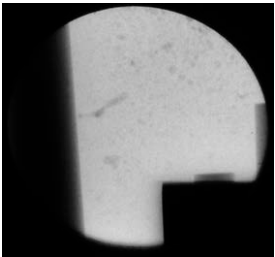
	<p><b>Grau 3</b></p> <p>Poro isolado, menor ou igual à Ø 2,0mm.</p> <p>Poros Múltiplos, menor que Ø 1,5 mm com distância entre poros de 2,0mm.</p>
	<p><b>Grau 4</b></p> <p>Poro isolado, a partir de Ø 3,0mm.</p>

TABELA 3 - Classificação de poros por contração (ASTM E 505).

Poros para paredes até 9,5mm quando em bruto	
	<p><b>Grau 1</b></p> <p>Poro isolado, até 2,5mm.</p>
	<p><b>Grau 2</b></p> <p>Poro isolado, até 6,0mm.</p>

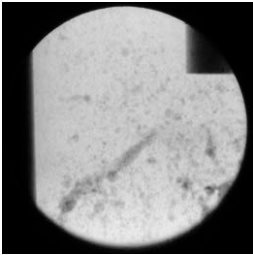
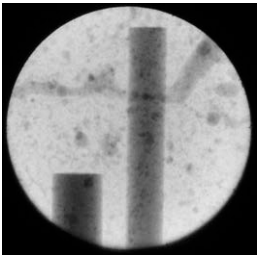
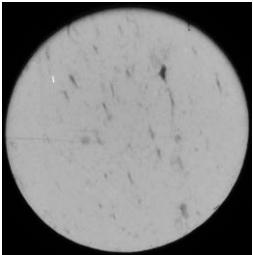
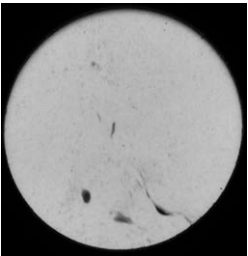
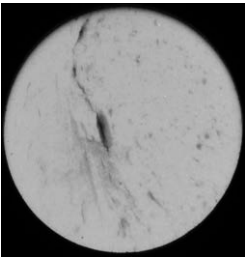
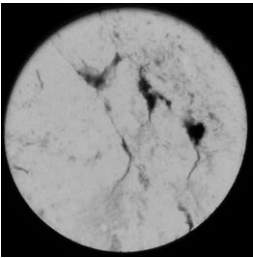
	<p><b>Grau 3</b></p> <p>Poro isolado, até 14,0mm.</p>
	<p><b>Grau 4</b></p> <p>Poro isolado, até 20,0mm.</p>

TABELA 4 - Classificação de poros por ar preso e encontro de fluxo (ASTM E 505).

Poros para paredes até 9,5mm quando em bruto	
	<p><b>Grau 1</b></p> <p>Poros até 2,0mm; Distância entre defeitos, 3,0mm</p>
	<p><b>Grau 2</b></p> <p>Poros até 5,0mm; Distância entre defeitos, 5,0mm</p>

	<p style="text-align: center;"><b>Grau 3</b></p> <p>Poros até 8,0mm; Distância entre defeitos, 7,0mm</p>
	<p style="text-align: center;"><b>Grau 4</b></p> <p>Poros acima de 8,0mm; Distância entre defeitos, 9,0mm</p>

## 2.6 PERDA DE CARGA NO PROCESSO *HPDC*

A perda de carga aplicada a moldes pode ser definida como, uma forma de dissipação de energia durante o fluxo de injeção do alumínio. Essa perda ocorre principalmente, devido às alterações de trajetória do canal, bem como alterações de geometria do produto, visto que a superfície do aço da matriz é polida e o coeficiente de atrito é desprezível. A perda de carga que ocorre ao longo do canal de alimentação é chamada de perda distribuída, enquanto que as perdas dentro do volume do produto denominam-se perda localizada.

Em produtos, onde o canal de alimentação não pode alcançar com eficiência todas as áreas, o resultado poderá ser decorrente de possíveis poros de nucleação, fenômeno que ocorre em função da queda de pressão durante o processo de injeção. A queda de pressão, conhecida na mecânica dos fluidos como perda de carga, as variáveis como o produto, trajetória do fluxo, turbulência e variações de geometria na trajetória do fluxo, contribuem e aceleram a perda de pressão no canal de alimentação, ou seja, há uma perda de eficiência durante o fluxo de injeção.



Quando o escoamento é simplesmente dentro do canal de alimentação, a sua parcela de perda de carga é desprezível. Assim a expressão de Bernoulli, pode ser aplicada diretamente sem a perda de carga.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{\bar{V}_1^2}{2} + \frac{g}{z_1} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{\bar{V}_2^2}{2} + \frac{g}{z_2} \quad (\text{Equação 1})$$

onde,

$P$  , é a pressão inicial;

$\rho$  , é a densidade;

$\bar{V}$  , é a velocidade média;

$g$  , é a gravidade;

$z$  , é a altura;

$_1$  , é o início do fluxo;

$_2$  , é o final do fluxo.

Importante lembrar que nesta equação, não se considera o atrito entre o fluido e a superfície da matriz para injeção. Portanto, neste caso, a expressão é generalizada. A aplicação dessa equação não é suficiente para o cálculo da perda de carga.

Para análise e resolução do problema da perda de carga devem-se incluir dois termos ao lado direito dessa equação, um para a perda de carga distribuída e outro para a perda de carga localizada:

$$f \frac{L}{D} \times \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (\text{perda distribuída}) \quad (\text{Equação 2})$$

onde,

$f$  é o fator de atrito devido ao material, e também à velocidade do fluxo de injeção;

L é o comprimento total do fluxo, distância do contra-pistão até a bolsa mais distante;

D é o diâmetro hidráulico da seção do canal de alimentação;

$\bar{V}$ , é a velocidade média, segmentada em parcelas de velocidade de 1º fase, velocidade de 2º fase e velocidade média dentro do produto.

Assim tem-se:

$$K \times \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (\text{Equação 3})$$

onde,

$K$ , é o coeficiente de perda de carga localizado.

e

$$f \times \frac{L_e}{D} \times \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (\text{Equação 4})$$

onde,

$f$ , é o fator de atrito;

$L_e$ , é o comprimento equivalente do canal de alimentação.

O fator de atrito  $f$  deve ser encontrado através de métodos experimentais. Já os fatores  $K$  e  $L_e$  podem ser obtidos em tabelas e gráficos. Esses dois fatores são calculados quase sempre de maneira experimental, fazendo com que os valores encontrados em uma literatura não sejam exatamente iguais aos encontrados em outra.

Para determinar o fator de atrito é necessário caracterizar o comportamento do fluido na seção a ser estudada, ou seja, definir se o fluxo de injeção é laminar ou turbulento. O comportamento do fluxo é definido por uma relação de grandezas entre forças de inércia e forças viscosas, sendo que a equação é conhecida na mecânica dos fluidos como o número adimensional de Reynolds.

$$R_e = \frac{\rho \times V \times D}{\mu} \quad (\text{Equação 5})$$

onde,

$R_e$ , é o número de Reynolds;

$D$ , é o diâmetro hidráulico da seção do canal de alimentação;

$\mu$ , é a viscosidade da liga.

Sendo assim, define-se que as perdas de carga em um processo de injeção de alumínio no processo HPDC podem ser representadas pelas equações matemáticas a seguir descritas. Na equação 6, que é o somatório das equações 3,4,5 e 6, é determinada como a primeira parcela de perda de carga, considerando a pressão injeção aplicada ao pistão da bucha de injeção até o contra-pistão:

$$\left( P_i + \rho \times \frac{\bar{V}_i^2}{2} + \rho \times g \times z_i \right) - \left( P_c + \rho \times \frac{\bar{V}_c^2}{2} + \rho \times g \times z_c \right) = \left( K \times \frac{\bar{V}^2}{2} \right) + \left( f \times \frac{L}{D} \times \frac{\bar{V}^2}{2} \right) \quad (\text{Equação 6})$$

onde,

$i$ , ponto de referência, início do fluxo, bucha de injeção;

$c$ , ponto de referência, final do fluxo, contra-pistão.

Na equação 7, a segunda parcela de perda de carga considera do contra-pistão até o início da alimentação da cavidade:

$$\left( P_c + \rho \times \frac{\bar{V}_c^2}{2} + \rho \times g \times z_c \right) - \left( P_{ia} + \rho \times \frac{\bar{V}_{ia}^2}{2} + \rho \times g \times z_{ia} \right) = \left( K \times \frac{\bar{V}^2}{2} \right) + \left( f \times \frac{L}{D} \times \frac{\bar{V}^2}{2} \right) \quad (\text{Equação 7})$$

onde,

$c$ , ponto de referência, início do fluxo, contra-pistão.

$ia$  , ponto de referência, final do fluxo, alimentação da cavidade.

Na equação 8, a terceira parcela de perda de carga considera o ataque de injeção do início até o final do fluxo de injeção:

$$\left( P_{ia} + \rho \times \frac{\bar{V}_{ia}^2}{2} + \rho \times g \times z_{ia} \right) - \left( P_{fa} + \rho \times \frac{\bar{V}_{fa}^2}{2} + \rho \times g \times z_{fa} \right) = \left( K \times \frac{\bar{V}^2}{2} \right) + \left( f \times \frac{L}{D} \times \frac{\bar{V}^2}{2} \right)$$

(Equação 8)

onde,

$ia$  , ponto de referência, início do fluxo, alimentação da cavidade.

$fa$  , ponto de referência, final do fluxo, final da alimentação.

Na equação 9 a quarta parcela de perda de carga considera o final do ataque de injeção até o ponto mais distante de produto.

$$\left( P_{fa} + \rho \times \frac{\bar{V}_{fa}^2}{2} + \rho \times g \times z_{fa} \right) - \left( P_p + \rho \times \frac{\bar{V}_p^2}{2} + \rho \times g \times z_p \right) = \left( K \times \frac{\bar{V}^2}{2} \right) + \left( f \times \frac{L}{D} \times \frac{\bar{V}^2}{2} \right)$$

(equação 9)

Sendo assim, devido ao fluxo de injeção durante o preenchimento da cavidade, conclui-se que a perda de carga em um canal de alimentação é um somatório de perdas de carga, seja pela turbulência em canais, quando o canal tem excesso de velocidades, pelas diferenças de trajetórias do canal de alimentação ou pela alteração de fluxo em função da geometria do produto desejado.

Por essa razão, para obter resultados com maior percentual de confiabilidade, deve-se considerar que os valores de perda de carga encontrados sempre estarão dentro de uma faixa de erro de 10%, margem de erro aceitável para a mecânica dos fluidos.

Canais de alimentação com o perímetro de fluxo maximizado podem ser utilizados para reduzir a quantidade de porosidade por contração. Quando o

percurso do fluxo de injeção é ampliado, ocorre a linearização do escoamento do material, ou seja, diminuiu-se a turbulência do canal.

Linearização do fluxo de injeção é recomendada, devido à alta velocidade de injeção, esta opção pode ser obtida com canais de maiores trajetórias. Por outro lado, isto pode aumentar a perda de carga, ou seja, gerar o aumento do gradiente de pressão de injeção, além de diminuir a eficiência metalúrgica do processo.

## 2.7 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

Seja a função generalizada  $\varphi(x)$  a ser ajustada:

$$\varphi(x) = \alpha_1 g_1(x) + \alpha_2 g_2(x) + \alpha_3 g_3(x) + \dots + \alpha_n g_n(x)$$

Sejam os pontos disponibilizados por meio de uma sequência histórica, ou obtidos através de experimentos ou medições.

$$\begin{array}{ccccccc} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_m \\ f(x_1) & f(x_2) & f(x_3) & \dots & f(x_m) \end{array}$$

O objetivo é encontrar os coeficientes  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ , tais que a função  $\varphi(x) = \alpha_1 g_1(x) + \alpha_2 g_2(x) + \alpha_3 g_3(x) + \dots + \alpha_n g_n(x)$  se aproxime ao máximo de  $f(x)$ .

O ajuste de  $\varphi(x)$  pelo método dos mínimos quadrados, consiste em escolher os  $\alpha_j, j = 1, \dots, n$ , de tal forma que:  $D = \sum_{k=1}^m d_k^2 = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \varphi(x_k)]^2$  seja mínimo. Os coeficientes  $\alpha_j, j = 1, \dots, n$ , que fazem com que  $\varphi(x)$  se aproxime ao máximo de  $f(x)$  são os que minimizam a função:

$$f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \varphi(x_k)]^2 = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)]^2$$

Para determinação dos coeficientes  $\alpha_j, j = 1, \dots, n$ , se acha as derivadas parciais e iguala-se a zero. Nos pontos de mínimo tem-se:

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha_j} = 0, \quad j = 1, \dots, n$$

Derivando a função  $F$ , tem-se:

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha_j} = 2 \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)] [-g_j(x_k)], \quad j = 1, \dots, n$$

Impondo a condição necessária para o mínimo, tem-se:

$$\sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)] [g_j(x_k)] = 0, \quad j = 1, \dots, n$$

De forma explícita, tem-se:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)] [g_1(x_k)] &= 0 \\ \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)] [g_2(x_k)] &= 0 \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)] [g_n(x_k)] &= 0 \end{aligned}$$

Separando os somatórios e isolando os termos com variáveis dos termos constantes, tem-se:

$$\begin{aligned}
& \left[ \sum_{k=1}^m g_1(x_k) g_1(x_k) \right] \alpha_1 + \left[ \sum_{k=1}^m g_2(x_k) g_1(x_k) \right] \alpha_2 + \dots + \left[ \sum_{k=1}^m g_n(x_k) g_1(x_k) \right] \alpha_n = \sum_{k=1}^m f(x_k) g_1(x_k) \\
& \left[ \sum_{k=1}^m g_1(x_k) g_2(x_k) \right] \alpha_1 + \left[ \sum_{k=1}^m g_2(x_k) g_2(x_k) \right] \alpha_2 + \dots + \left[ \sum_{k=1}^m g_n(x_k) g_2(x_k) \right] \alpha_n = \sum_{k=1}^m f(x_k) g_2(x_k) \\
& \left[ \sum_{k=1}^m g_1(x_k) g_n(x_k) \right] \alpha_1 + \left[ \sum_{k=1}^m g_2(x_k) g_n(x_k) \right] \alpha_2 + \dots + \left[ \sum_{k=1}^m g_n(x_k) g_n(x_k) \right] \alpha_n = \sum_{k=1}^m f(x_k) g_n(x_k)
\end{aligned}$$

As equações acima formam um sistema de equações lineares que de forma matricial pode ser representado por:

$$A\alpha = \underline{b}$$

onde,

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad \underline{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} \quad \underline{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

cujos valores dos elementos da matriz de coeficientes e do vetor independente são determinados por:

$$a_{ij} = a_{ji} = \sum_{k=1}^m g_i(x_k) g_j(x_k) \quad \text{para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, n;$$

$$b_i = \sum_{k=1}^m f(x_k) g_i(x_k) \quad \text{para } i = 1, \dots, n;$$

onde,

$n$ , é o número de termos da função  $\varphi(x)$  a ser ajustada;

$m$  é o número de pontos da amostra conhecida.

### 3 METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização desta pesquisa, foi optado em trabalhar com os principais parâmetros do processo de injeção de alumínio sob pressão, controláveis e mensuráveis, podendo destacar a liga do alumínio, temperatura da matriz, temperatura do alumínio, pressão de injeção, velocidade de primeira e da velocidade de segunda fase. A velocidade de primeira e de segunda fase, definidas como condições de contorno, são configuradas diretamente no painel da injetora.

O valor da pressão de injeção depende do diâmetro do pistão, na qual trabalha internamente na bucha de injeção, porém é importante destacar que o valor do diâmetro do pistão, depende da taxa de ocupação volumétrica, porém nessa pesquisa a pressão de injeção, ficou definida como parâmetro constante. A taxa de ocupação volumétrica depende do volume necessário para cada ciclo de injeção, sendo assim, o somatório dos volumes de produto, canais e bolsas. Experimentalmente recomenda-se que o volume da taxa de ocupação volumétrica fique entre 40 a 60% do volume disponível na bucha de injeção.

Na figura 32 é apresentado o fluxograma da tese presente. A realização das etapas propostas permitiu uma boa fonte confiável de dados para análises e conclusão de resultados.

Na sequência, a figura 33 apresenta o fluxograma das simulações, detalhando o procedimento de pré-processamento e quais os resultados esperados no pós-processamento.

Espera-se, com as simulações computacionais, entender o comportamento da porosidade e assim prever soluções na prevenção dessa falha em produtos injetados através do processo *HPDC*.

Os diferentes tamanhos de porosidade, foram investigados com o auxílio de equipamento de raios X.



FIGURA 32 – Fluxograma proposto para a pesquisa.

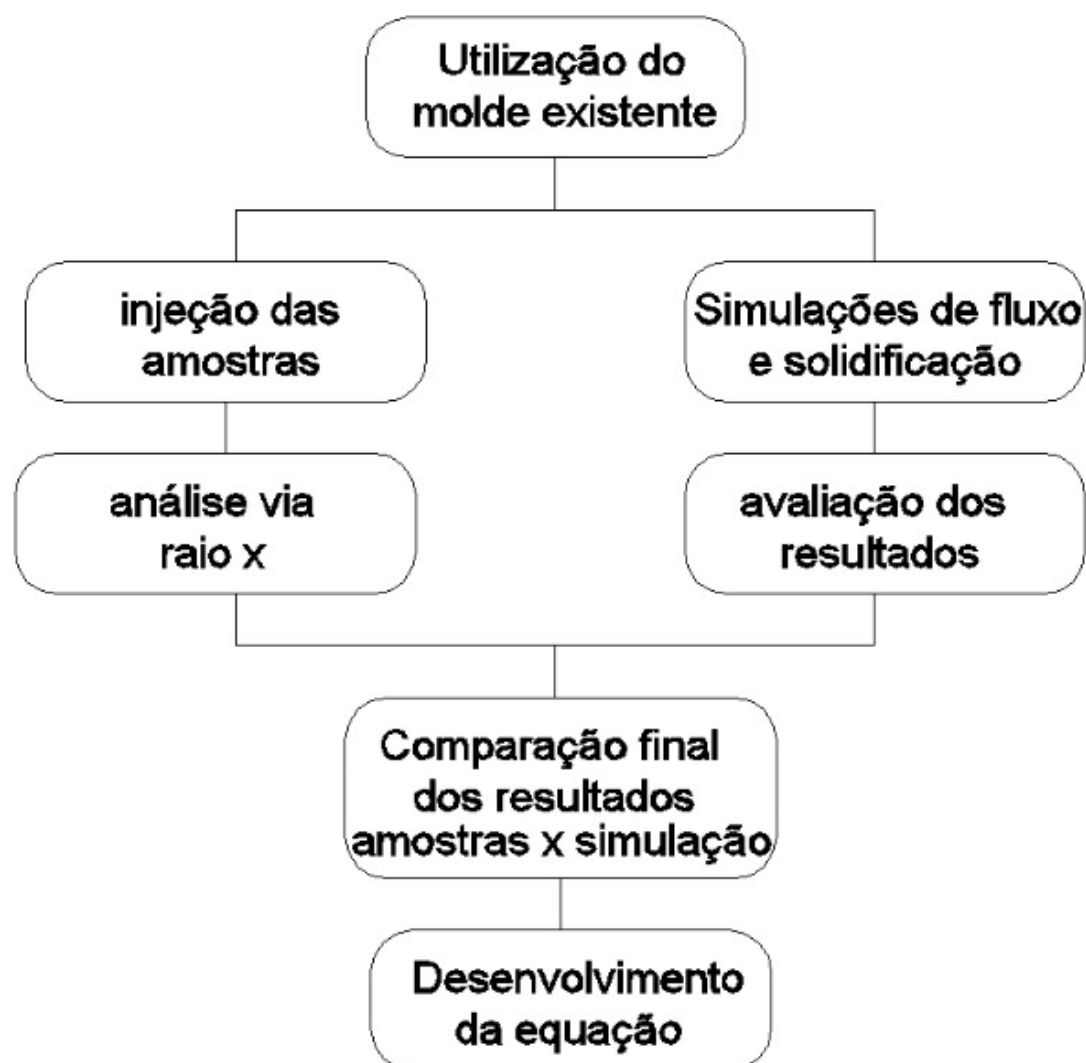
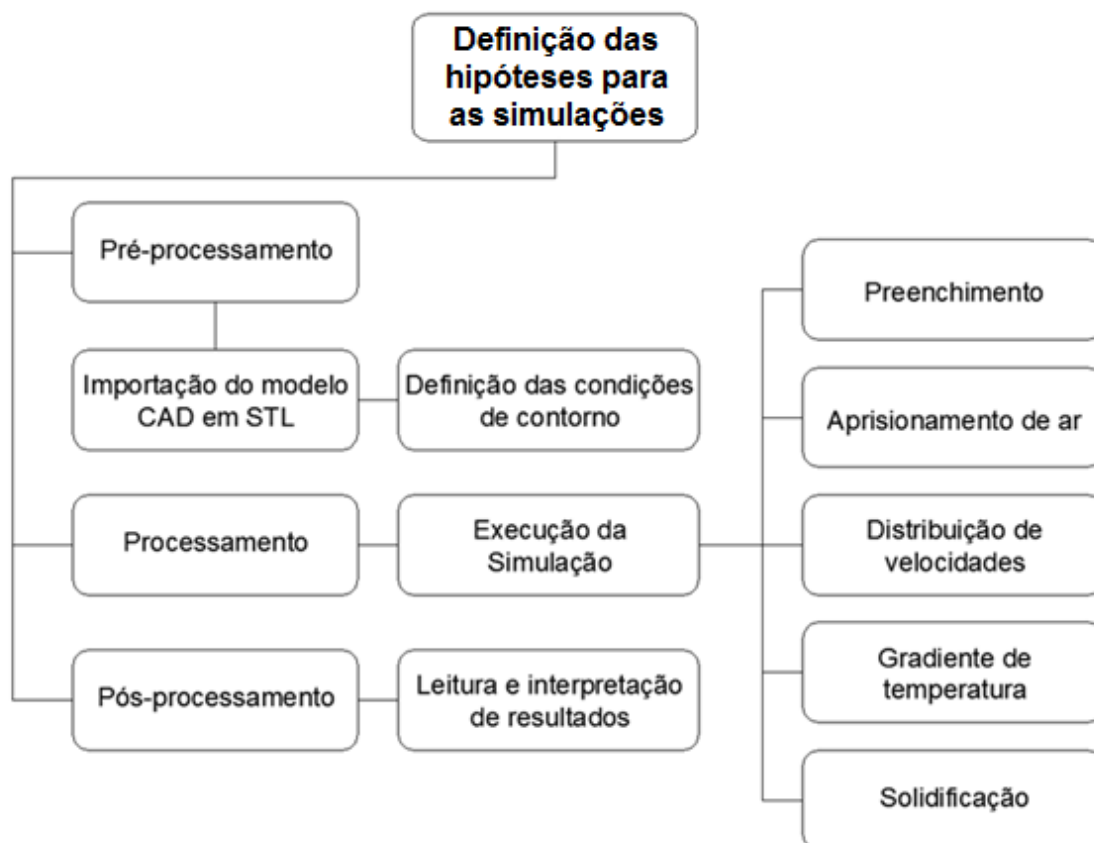


FIGURA 33 – Fluxograma proposto para a realização das simulações.

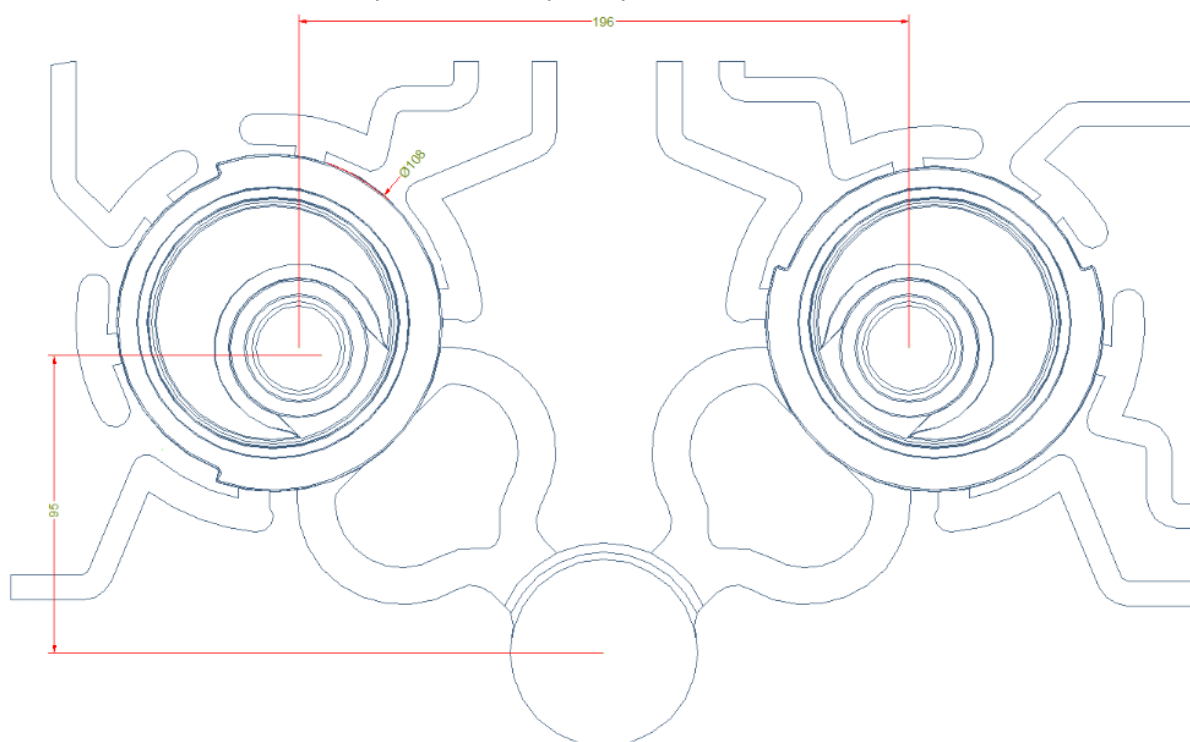


### 3.1 MOLDE PARA INJEÇÃO DAS AMOSTRAS

Para injeção das amostras optou-se pela parceria com a Metalúrgica Starcast Ltda., localizada em Guarulhos SP, onde foi utilizado um molde para injeção de alumínio existente, também fornecido pela mesma empresa. A escolha por esta ferramenta se deu pelo histórico de porosidade ao longo de sua vida. Assim foi possível eliminar custos de construção de molde e reduzir o tempo de pesquisa.

Na figura 34 é apresentado o desenho do corpo de prova, na qual será obtido no molde citado.

FIGURA 34 – Modelamento do produto do corpo de prova.



Para a obtenção das amostras através do processo *HPDC*, foi definido variar os percentuais da velocidade de primeira e da velocidade de segunda fase, sendo a pressão de injeção, foi definido como um parâmetro de processo constante. Na tabela 5 são apresentados os materiais, tratamentos e dureza, dos principais componentes do molde para a injeção das amostras.

TABELA 5 - Configuração estrutural do molde

COMPONENTE	AÇO	TRATAMENTOS TÉRMICOS
Matriz superior	AISI H13	Temperado, revenido e nitretado, 44 HRc
Matriz inferior	AISI H13	Temperado, revenido e nitretado, 44 HRc
Colunas	SAE 8620	Temperado, revenido e cementado, 58 HRc
Buchas	SAE 8620	Temperado, revenido e cementado, 58 HRc.
Placa extratora	SAE 1045	Não aplicado

### 3.2 INJEÇÃO DAS AMOSTRAS

Para realizar obter as amostras, foi necessário injetar os parâmetros apresentados na tabela 6. Para iniciar a injeção das amostras, foi primeiramente necessário realizar a fusão de 10 kg da liga SAE 308, para o qual foi utilizado um forno de indução elétrica da marca Inductotherme com potência de 250 kW, apresentado na figura 35. Para compensar o calor perdido durante o processo de desgaseificação e o deslocamento até o forno dosador, a carga foi aquecida até a temperatura de 760°C

FIGURA 35 – Forno de indução elétrica.



O tempo necessário para atingir a temperatura de manuseio foi de 30 minutos. Já para a realização da desgaseificação, a carga foi transferida para o cadinho de transporte, onde ficou borbulhando em nitrogênio durante 10 minutos. Após a retirada da escória concentrada na superfície do cadinho, a carga foi transportada por uma empilhadeira até o forno autodosador da injetora.

Para a produção das amostras foi utilizada uma injetora Colosio 550T, conforme mostra a figura 36. A célula de injeção é composta pelo forno autodosador, injetora, robô para retirada do produto do molde, tanque de resfriamento e rebarbador. Nessa célula de injeção, todo o processo é automatizado, restando ao operador apenas a supervisão do processo.

FIGURA 36 – Injetora de alumínio para o processo HPDC.



O ciclo de injeção inicia com a dosagem automática pelo forno da carga de alumínio a ser injetada na bucha de injeção. Ao injetar o alumínio, o produto se solidifica, a injetora e o molde se abrem para que o robô retire pelo canal de alimentação o produto do molde.

Durante este processo, foi necessária a aplicação de desmoldante na matriz do molde por um mecanismo na parte superior da injetora, esse recurso é importante, porque o alumínio agarra na superfície da matriz, dificultando a extração do produto. Todo este processo é realizado de forma automatizada, durando cerca de 80 segundos.

Na tabela 6, é apresentado parâmetros de injeção aplicados para a injeção das amostras.

TABELA 6 - Definição dos parâmetros de injeção

Temperatura do alumínio líquido (C)	760
Temperatura do molde (C)	288
Velocidade primeira fase (m/s)	Variável
Velocidade segunda fase (m/s)	Variável
Pressão de injeção (Bar)	734
Curso do pistão (mm)	250

Na tabela 7, é apresentada a composição química da liga de alumínio 308, que foi utilizada para a injeção das amostras.

TABELA 7 – Composição química da liga 308,

Elemento	Si	Cu	Mn	Mg	Fe	Zn	Ni	Al
%	9.5	3.0	0.4	0.5	0.9	1.0	0.3	Rest

### 3.3 APLICAÇÃO DAS HIPÓTESES NO PROCESSO

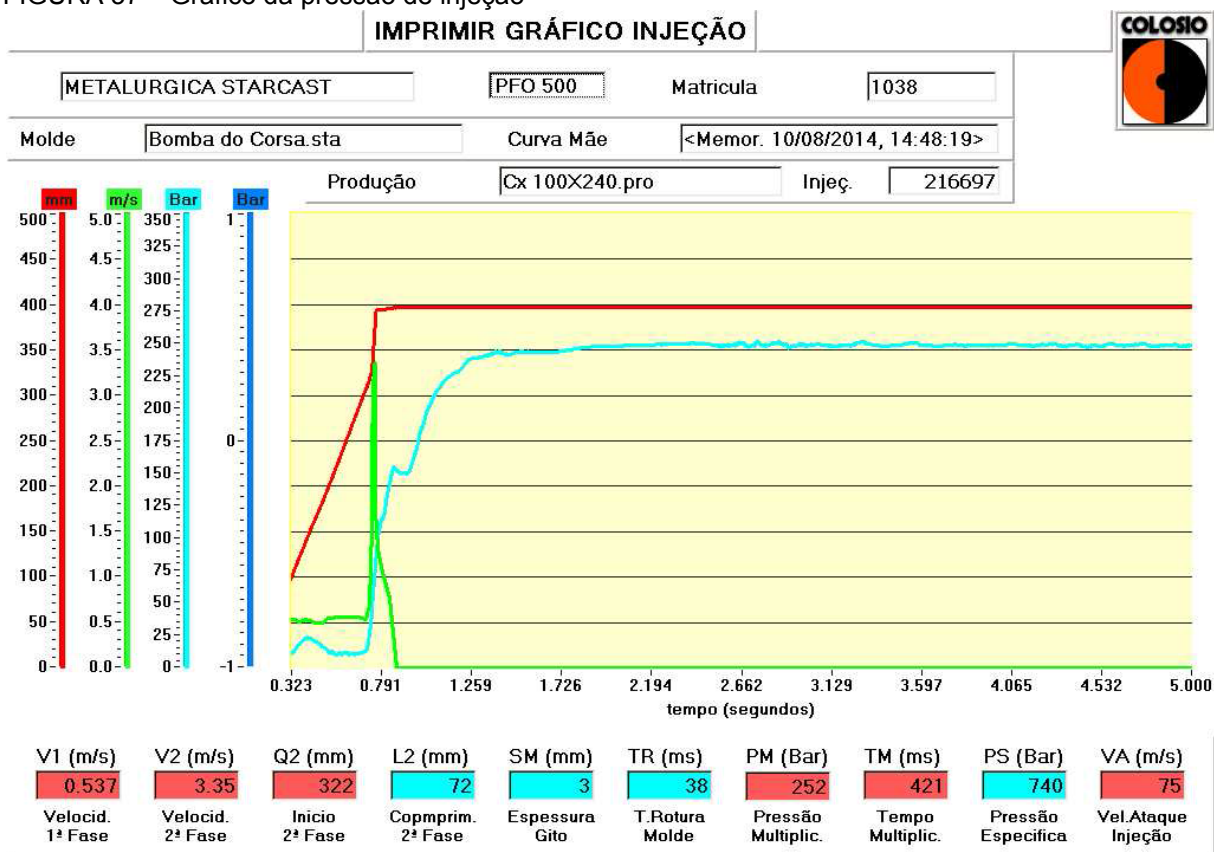
Para analisar a influência da velocidade de primeira fase e a velocidade de segunda fase, quanto ao comportamento da porosidade no processo *HPDC*, foi necessária a combinação de condições de contorno, sejam elas na simulação via elementos finitos, bem como a sua reprodução durante o processo de injeção sob pressão.

Com a combinação das condições de contorno propostas com a tabela 6 e com a tabela 8, foi possível realizar as simulações para compreender o comportamento da porosidade.

Na figura 37 é apresentado, o gráfico de como se comporta a pressão de injeção do alumínio em função das velocidades de primeira e de segunda fase na injetora Colosio 500T, pode-se destacar:

- V1, velocidade resultante de primeira fase em m/s;
- V2, velocidade resultante de segunda fase em m/s;
- Q2, é a distância percorrida do pistão da bucha de injeção, na qual se inicia a segunda fase em mm;
- L2, é a distância de atuação da segunda fase em mm;
- PS, pressão específica ou pressão de injeção em Bar; e
- VA, é velocidade resultante no ataque em m/s.

FIGURA 37 – Gráfico da pressão de injeção





Os percentuais escolhidos, para a velocidade de primeira e a velocidade de segunda fase foram definidos a partir de valores mínimos necessários para obter os produtos através do processo *HPDC*. Para o caso da velocidade de primeira fase, não foi possível obter amostras físicas com condições mínimas de preenchimento, quando o percentual é abaixo de 15%, já para a velocidade máxima de primeira e de segunda fase, o máximo possível fornecido pela injetora é de 99%. Quanto à pressão de injeção, foi adotado o valor constante de 724bar.

Na tabela 8, são apresentados os parâmetros de injeção aplicados na injetora. Onde o %Vp, é o percentual da velocidade da primeira fase, parâmetro definido em percentual no painel da injetora, o Vp, velocidade da primeira fase em m/s, é o valor resultante a partir do %Vp, sendo que a injetora calcula automaticamente. A mesma analogia é aplicada ao %Vs, percentual da velocidade da segunda fase e ao Vs, velocidade da segunda fase em m/s.

TABELA 8 - Definição dos parâmetros de injeção

Hipótese	% Vp	Vp (m/s)	% Vs	Vs (m/s)
1	15	0,03	5	0,58
2	15	0,03	50	3,57
3	15	0,03	99	4,20
4	50	0,26	5	0,58
5	50	0,27	50	3,20
6	50	0,26	99	4,01
7	99	0,28	5	0,82
8	99	0,28	50	2,81
9	99	0,29	99	3,15

Depois da retirada das amostras, nos parâmetros de injeção propostos, foram realizadas as simulações com as mesmas condições de processo para a validação dos resultados. Para entender a influência das variáveis do processo de injeção no comportamento da porosidade, foram simuladas as seguintes condições:



- Tempo de preenchimento;
- Velocidade no canal de alimentação;
- Tempo de solidificação;
- Porosidade.

Os resultados obtidos através das simulações, como o tempo de preenchimento, permite que durante o projeto do molde, possa avaliar a eficiência do fluxo de injeção e ainda possibilita que a fundição estime o tempo de produtividade durante o processo de injeção.

Analisar a velocidade no canal de alimentação é importante para controlar sua amplitude máxima, pois quando acima do recomendável cerca de 40 m/s, a energia aplicada à matriz devida choque do fluxo de injeção no aço da matriz, resulta em um aumento concentração de calor, reduzindo de forma a dureza do aço, possibilitando a geração de trincas no aço, problema comum do processo *HPDC*, porém esse resultado não tem interferência direta ao comportamento da porosidade proposta.

Já o tempo de solidificação é importante para controlar as concentrações de massa, ajuda a auxiliar na localização da refrigeração da matriz do molde, além de permitir que a fundição possa estimar a produtividade do molde. Somando o tempo de preenchimento mais o tempo de solidificação, tem-se o tempo bem aproximado do ciclo de injeção.

Quanto o resultado da porosidade, não identifica seu comportamento e origem, mas é importante para analisar o seu volume e localização no produto, auxiliando durante o projeto do molde, prever se a porosidade comprometerá o produto quando a classificação de aceitação de porosidade, ou ainda, se a porosidade encontra-se em regiões que sofrerão processo de usinagem posterior.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 9, foram apresentados os valores simulados na seção de alimentação do produto, sendo que o valor destacado em vermelho é o recomendável, pois visa o fluxo com menor tendência a turbulência e ainda pode maximizar a vida da matriz. Segundo a NADCA, recomendam-se valores aproximados aos 40m/s para a velocidade no canal de alimentação, para o preenchimento do produto. Valores acima deste, aumentam de forma consideravelmente a probabilidade de desgaste na matriz, falha proveniente da cavitação na matriz devido ao fluxo de injeção.

Ainda na tabela 9, são apresentados os valores das velocidades obtidas no canal de alimentação simulado. O melhor resultado obtido na simulação foi para a velocidade de primeira fase em 0,290 m/s e com a velocidade de segunda fase em 3,150 m/s, resultando com a velocidade no ataque em 42,855 m/s. Assim verificou-se através da tabela 11 que a velocidade ideal no ataque, não é determinante para o menor volume de poros no processo HPDC.

TABELA 9 - Velocidade no ataque

Velocidade 1° fase (m/s)	Velocidade 2° fase (m/s)	Velocidade no ataque (m/s)
0,03	0,58	11,282
0,03	3,57	86,106
0,03	4,20	101,160
0,26	0,58	22,687
0,27	3,20	81,354
0,26	4,01	101,190
0,28	0,82	14,832
0,28	2,81	56,622
<b>0,29</b>	<b>3,15</b>	<b>42,855</b>

A partir dos resultados obtidos nas simulações apresentadas tabela 9, foi desenvolvida a equação matemática para a velocidade do canal, com o auxílio do software Jump. Utilizando o método do mínimo quadrado, com a equação em função da velocidade de primeira fase e de velocidade de segunda fase, resultando:

$$\varphi(x) = \alpha_1 g_1(x) + \alpha_2 g_2(x) + \alpha_3 g_3(x) + \dots + \alpha_n g_n(x)$$

$$f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \varphi(x_k)]^2 = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)]^2$$

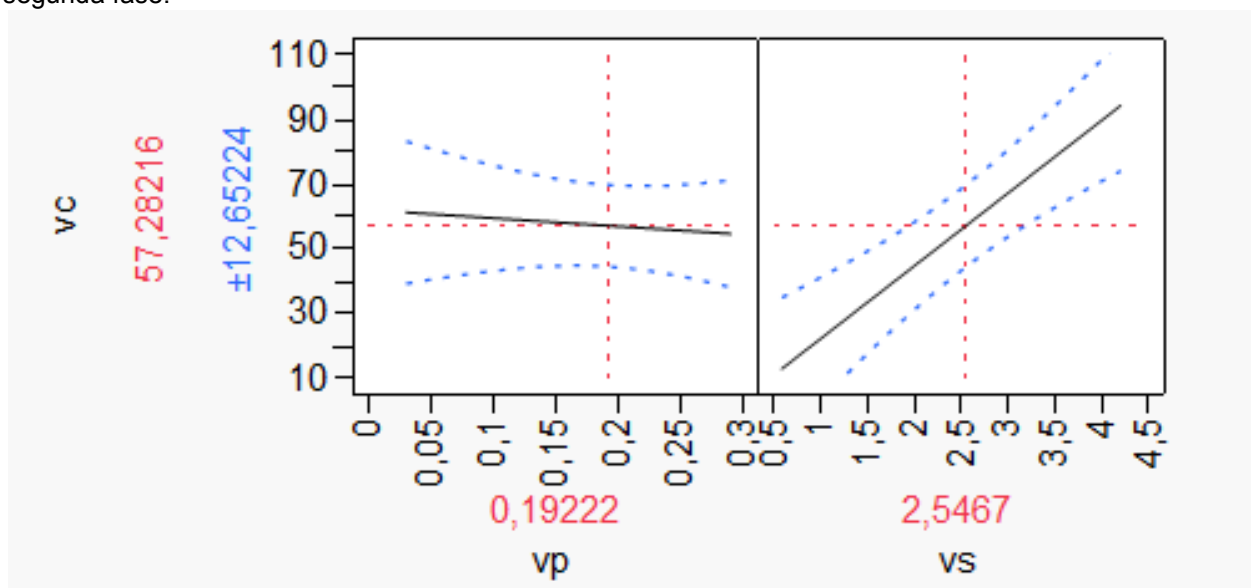
$$vc = f(vp, vs)$$

Tem-se o seguinte modelo estatístico para a velocidade do canal:

$$vc = 4,9509 - 25,3853 \times vp + 22,4649 \times vs + (vp - 0,1922) \times ((vs - 2,5467) \times -15,2192)$$

Nos gráficos da figura 38, é apresentado o comportamento da velocidade no canal de alimentação, onde foi verificada a variação da velocidade no canal de alimentação, em função da velocidade de primeira e de segunda fase. Fica evidente que não há influência da velocidade de primeira fase para o canal de alimentação, porém a velocidade de segunda fase interfere diretamente na velocidade do canal, ou seja, na seção onde alimenta o produto na cavidade do molde.

FIGURA 38 – Velocidade no canal de alimentação em função da velocidade de primeira e de segunda fase.



Na tabela 10, é apresentado o tempo de preenchimento em função da velocidade de primeira fase e da velocidade de segunda fase. Para o menor tempo de preenchimento, é quando a velocidade no ataque consegue preencher a cavidade em um menor tempo. Sendo assim, o menor tempo obtido na simulação,

foi para a velocidade de primeira fase em 0,290 m/s e para a velocidade de segunda fase em 3,150 m/s, resultando no menor tempo de preenchimento de 0,467 s, coincidindo com a melhor velocidade no ataque de 42,855 m/s apresentado na tabela 9.

Coincidentemente, tanto a melhor velocidade no ataque apresentado na tabela 9, bem como o menor tempo de preenchimento apresentado na tabela 10, não refletiu no menor volume de porosidade apresentado na tabela 11.

TABELA 10 - Tempo de preenchimento

Velocidade 1° fase (m/s)	Velocidade 2° fase (m/s)	Tempo de preenchimento (s)
0,03	0,58	4,4249
0,03	3,57	4,2956
0,03	4,20	4,2725
0,26	0,58	0,4909
0,27	3,20	0,4973
0,26	4,01	0,5114
0,28	0,82	0,4814
0,28	2,81	0,4842
<b>0,29</b>	<b>3,15</b>	<b>0,4674</b>

Com os valores obtidos nas simulações e, utilizando o método dos mínimos quadrados, encontra-se a equação do tempo de preenchimento em função das velocidades de primeira e de segunda fase.

$$\varphi(x) = \alpha_1 g_1(x) + \alpha_2 g_2(x) + \alpha_3 g_3(x) + \dots + \alpha_n g_n(x)$$

$$F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \varphi(x_k)]^2 = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)]^2$$

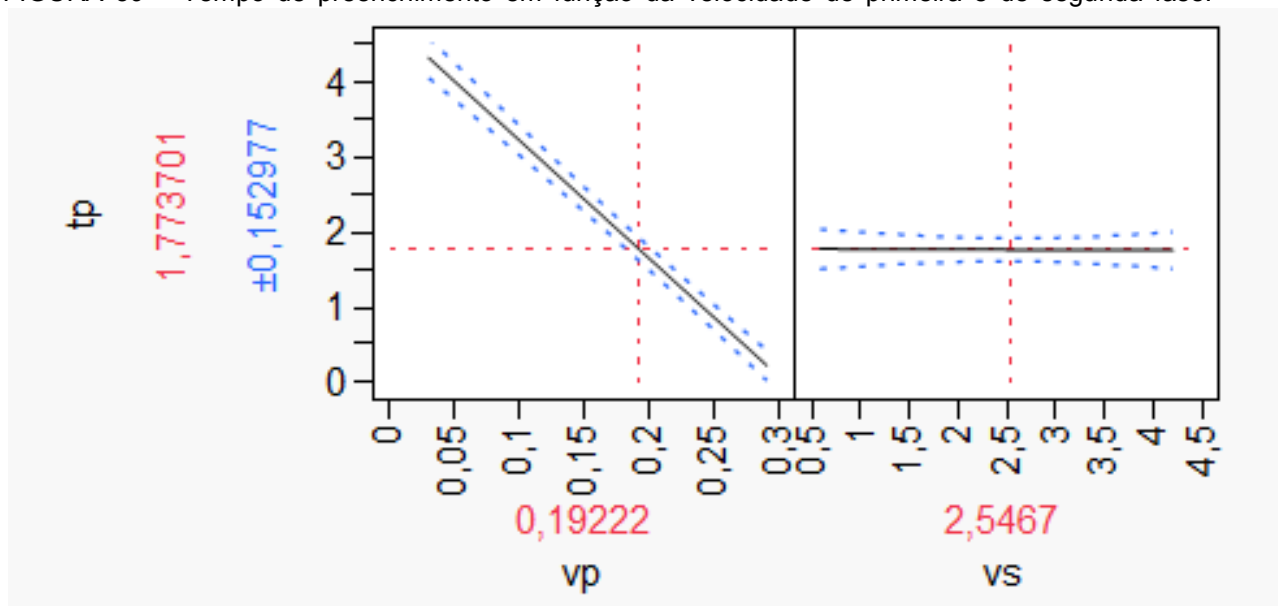
$$tp = f(vp, vs)$$

Tem-se o seguinte modelo estatístico para o tempo de preenchimento:

$$tp = 4,8109 - 15,7342 \times vp - 0,005034 \times vs + (vp - 0,1922) \times ((vs - 2,5466) \times 0,2227$$

Na figura 39, é apresentado o comportamento do tempo de preenchimento em função das velocidades. Diferente da velocidade no canal, o tempo de preenchimento é dependente da velocidade de primeira fase. Na velocidade de segunda fase, o tempo de preenchimento apresentou o comportamento constante.

FIGURA 39 – Tempo de preenchimento em função da velocidade de primeira e de segunda fase.



Na tabela 11, é apresentado os valores do tempo de solidificação em função da velocidade de primeira fase e da velocidade de segunda fase. Nesta tabela é destacado o menor tempo de solidificação, mas é importante que o tempo de solidificação seja o menor possível, porque além de maximizar a produtividade através do processo HPDC, diminui-se o gradiente de temperatura na matriz, reduzindo as tensões térmicas no molde e ainda pode estabilizar as propriedades mecânicas no produto.

Quanto maior o tempo de solidificação, maior é a contribuição do efeito da concentração de massa do produto, na geração de porosidade. Conforme resultados obtidos nas simulações, quanto menor o tempo de solidificação, menor é o volume de porosidade gerada através do processo HPDC.

TABELA 11 - Tempo de solidificação

Velocidade 1° fase (m/s)	Velocidade 2° fase (m/s)	Tempo de solidificação (s)
0,03	0,58	13,8790
0,03	3,57	2,9293
0,03	4,20	3,5075
0,26	0,58	2,7271
<b>0,27</b>	<b>3,20</b>	<b>2,4435</b>
0,26	4,01	2,4876
0,28	0,82	2,6421
0,28	2,81	2,5072
0,29	3,15	2,4983

A partir dos resultados obtidos na tabela 11, é apresentada a equação estatística do tempo de solidificação em função da velocidade de primeira e da velocidade de segunda fase.

$$\varphi(x) = \alpha_1 g_1(x) + \alpha_2 g_2(x) + \alpha_3 g_3(x) + \dots + \alpha_n g_n(x)$$

$$f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \varphi(x_k)]^2 = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)]^2$$

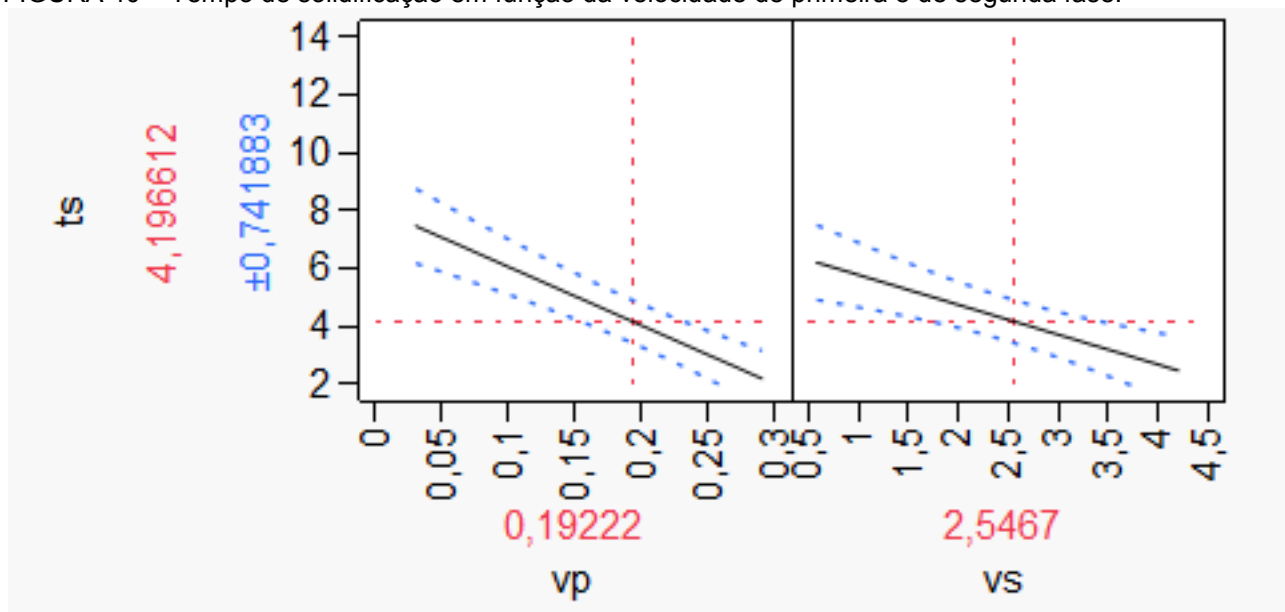
$$ts = f(vp, vs)$$

Tem-se o seguinte modelo estatístico para o tempo de solidificação:

$$ts = 10,7290 - 20,3001 \times vp - 1,0328 \times vs + (vp - 0,1922) \times ((vs - 2,5467) \times 12,7897$$

Na figura 40, é apresentada a influência da velocidade de primeira fase e da velocidade de segunda fase, para o tempo de solidificação. Observa-se que as curvas do tempo de solidificação são semelhantes para ambas as condições.

FIGURA 40 – Tempo de solidificação em função da velocidade de primeira e de segunda fase.



Na tabela 12 é apresentada, os valores finais simulados dos volumes de porosidade para cada hipótese proposta, sendo que a melhor condição é quando o volume é de 698,75 mm<sup>3</sup>.

A partir dos resultados simulados, verificou-se que o menor volume de porosidade se dá quando o tempo de solidificação é menor, e que o tempo de preenchimento e a velocidade no canal de alimentação não tem influência no resultado do volume de porosidade. Portanto, é importante minimizar gradientes de temperatura durante o fluxo de preenchimento, bem como se desenvolver circuitos de refrigeração com eficiência para a matriz do molde, com aplicação ao processo HPDC.

Para o menor tempo de preenchimento, não apresentou influência positiva no comportamento da porosidade. Portanto, o menor tempo pode ser possivelmente contribuir, para a geração de porosidade através do ar preso, e o excesso de velocidade, pode contribuir na geração de porosidade em função da turbulência no fluxo de injeção, resultando também em porosidade através do ar preso.

TABELA 12 - Porosidade

Velocidade 1° fase (m/s)	Velocidade 2° fase (m/s)	Porosidade (m³)
0,03	0,58	6,8269e-06
0,03	3,57	6,8612e-06
0,03	4,20	9,7893e-06
0,26	0,58	9,6775e-06
<b>0,27</b>	<b>3,20</b>	<b>6,8975e-07</b>
0,26	4,01	1,0113e-05
0,28	0,82	9,1557e-06
0,28	2,81	7,1241e-06
0,29	3,15	1,013e-05

A partir dos resultados apresentados na tabela 12, é apresentado o modelo matemático da porosidade em função das velocidades de primeira e de segunda fase.

$$\varphi(x) = \alpha_1 g_1(x) + \alpha_2 g_2(x) + \alpha_3 g_3(x) + \dots + \alpha_n g_n(x)$$

$$F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \varphi(x_k)]^2 = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)]^2$$

$$p = f(vp, vs)$$

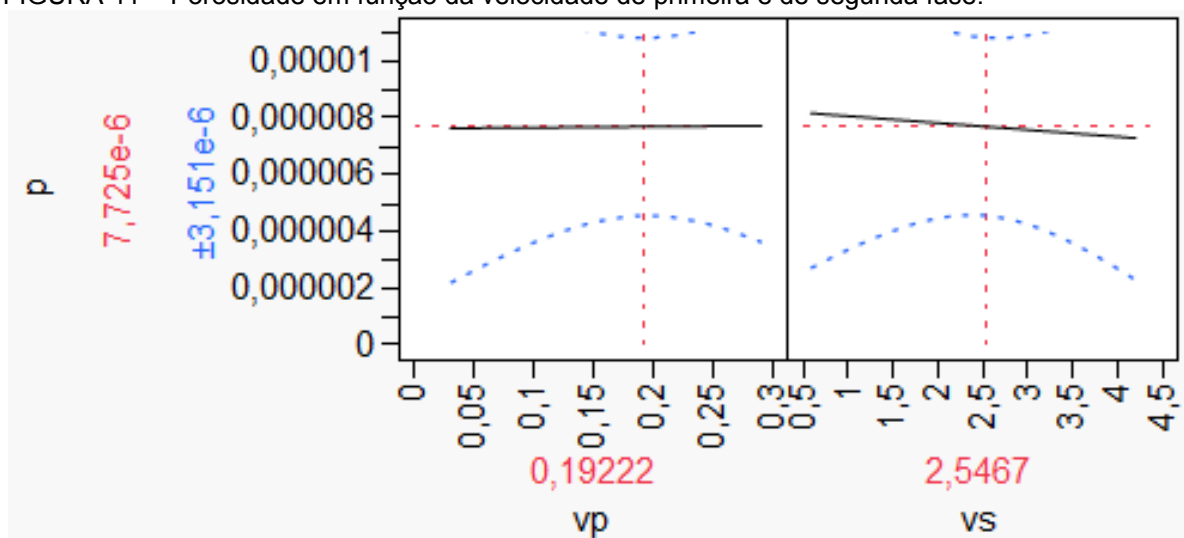
Tem-se assim o seguinte o modelo estatístico para o tempo de solidificação:

$$p = 0,00000008281 + 0,0000003290 \times vp - 2,4307e - 7 \times vs + (vp - 0,1922) \times ((vs - 2,5467) \times -0,0000004999$$

Na figura 41, é possível verificar que tanto a velocidade de primeira fase, como a velocidade de segunda fase não tem uma relação direta com o volume de porosidade. O menor volume de porosidade, foi obtido com a velocidade de primeira fase em 0,270m/s e com a velocidade de segunda fase em 3,200m/s, conclui-se que o menor volume de poros está relacionado com o menor tempo de solidificação, como foi apresentado na tabela 11.



FIGURA 41 – Porosidade em função da velocidade de primeira e de segunda fase.



Na tabela 13 apresenta-se o resumo geral, de todos os valores obtidos nas simulações para cada condição de contorno proposta. Na hipótese 5 (coluna H), foi verificada a melhor condição obtida nas simulações. Porém, variáveis de processo - entre outros - não podem ser simulados. Sendo assim, existe uma margem de erro possível do resultado da simulação versus resultados obtidos por raios X, conforme apresentado na figura 42.

FIGURA 42 – Raios X da simulação comparado ao produto final.

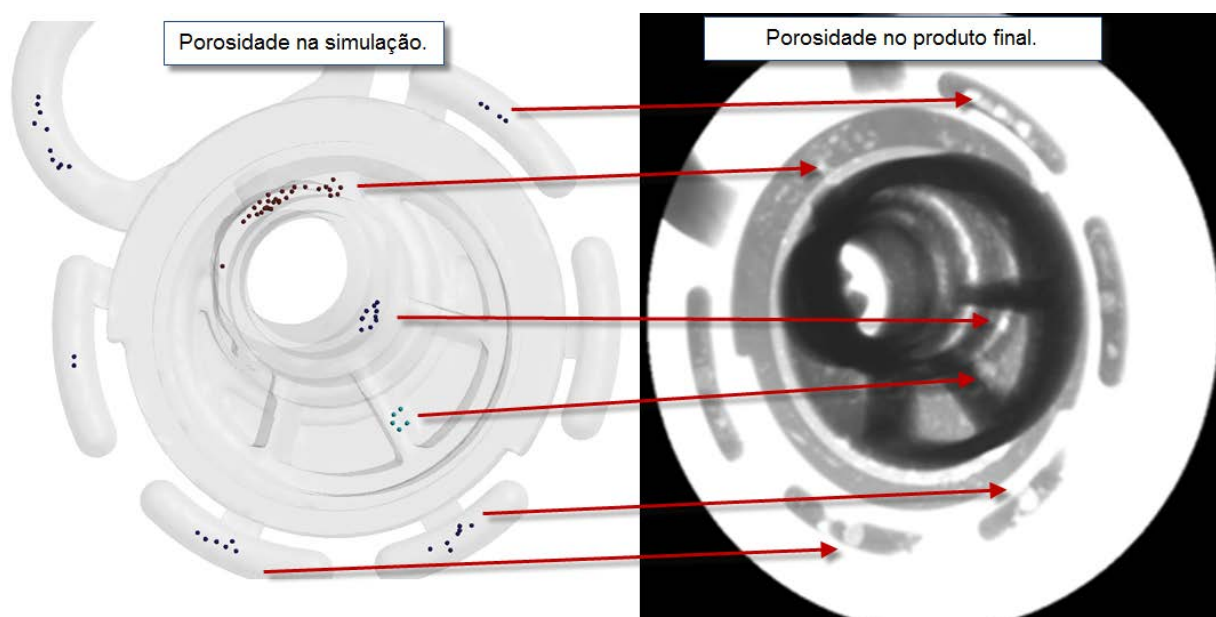


TABELA 13 - Resultados gerais do pós processamento

H	Velocidade 1° fase (m/s)	Velocidade 2° fase (m/s)	Velocidade no canal (m/s)	Tempo de preenchimento (s)	Tempo de solidificação (s)	Porosidade (m³)
1	0,03	0,58	11,282	4,4249	13,879	6,8269e-06
2	0,03	3,57	86,106	4,2956	2,9293	6,8612e-06
3	0,03	4,20	101,160	4,2725	3,5075	9,7893e-06
4	0,26	0,58	22,687	0,4909	2,7271	9,6775e-06
<b>5</b>	<b>0,27</b>	<b>3,20</b>	<b>81,354</b>	<b>0,4973</b>	<b>2,4435</b>	<b>6,8975e-07</b>
6	0,26	4,01	101,190	0,5114	2,4876	1,0113e-05
7	0,28	0,82	14,832	0,4814	2,6421	9,1557e-06
8	0,28	2,81	56,622	0,4842	2,5072	7,1241e-06
9	0,29	3,15	42,855	0,4674	2,4983	1,0130e-05

Para desenvolver a equação matemática estatística com o software Jump, foi utilizados os valores das velocidades de primeira fase, das velocidades de segunda fase, das velocidades no canal, dos tempos de preenchimento, dos tempos de solidificação e por fim, dos volumes de porosidade, apresentados na tabela 13.

$$\varphi(x) = \alpha_1 g_1(x) + \alpha_2 g_2(x) + \alpha_3 g_3(x) + \dots + \alpha_n g_n(x)$$

$$F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \varphi(x_k)]^2 = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)]^2$$

$$p = f(vp, vs, vc, tp, ts)$$

A equação matemática estatística geral do comportamento da porosidade proposta é representada como função das variáveis velocidade de primeira fase, velocidade de segunda fase, velocidade no canal, tempo de preenchimento e tempo de solidificação.

$$p = 0,0001667 - (0,0005424 \times vp) + (0,00001143 \times vs) - (0,0000004639 \times vc) - (0,00003553 \times tp) + (0,0000001385 \times ts) + (vp - 0,1922) \times ((vs - 2,5467) \times (-0,00002186))$$

A equação geral do comportamento da porosidade, é ainda mais completa quando se aplica, às variáveis temperatura do molde, normalmente entre 250 a 260 °C, simultaneamente com a temperatura do alumínio injetado, variando entre 690 a 700 °C.

$$\varphi(x) = \alpha_1 g_1(x) + \alpha_2 g_2(x) + \alpha_3 g_3(x) + \dots + \alpha_n g_n(x)$$

$$F(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \varphi(x_k)]^2 = \sum_{k=1}^m [f(x_k) - \alpha_1 g_1(x_k) - \alpha_2 g_2(x_k) - \dots - \alpha_n g_n(x_k)]^2$$

$$p = f(vp, vs, vc, tp, ts, tm, ta)$$

Sendo assim, através da combinação da tabela 6 com os resultados simulados apresentados na tabela 13, a equação matemática estatística que representa o comportamento porosidade, proposta e obtida através do software Jump incluindo todos os parâmetros do processo HPDC é:

$$\begin{aligned} p = & -0,001112 - 0,00008212 \times \left( \frac{(vp - 0,16)}{0,13} \right) + 0,00001243 \times \\ & \left( \frac{(vs - 2,39)}{1,81} \right) - 0,00001616 \times \left( \frac{(vc - 56,236)}{44,954} \right) - 0,00007271 \times \\ & \left( \frac{(tp - 2,4461)}{1,9787} \right) - 0,0000007405 \times \left( \frac{(ts - 8,1612)}{5,7177} \right) + 0,0000002099 \times tm \\ & + 0,000001523 \times ta + \left( \frac{(vs - 2,39)}{1,81} \right) \times \left( \left( \frac{(vc - 56,236)}{44,954} \right) \right) \times 0,000002663 \\ & + (tm - 255,4444) \end{aligned}$$

#### 4.1 AVALIAÇÃO DAS AMOSTRAS EM EQUIPAMENTOS DE RAIOS X

Após injeção das amostras, totalizando 3 amostras por hipóteses, conforme tabela 13, totalizando 27 amostras. Depois de contempladas, todas as condições de contorno de engenharia e de processo conforme apresentadas na tabela 6 e na

tabela 8, foram possíveis analisá-las através do aparelho de raios X, equipamento cedido pela Alumec Ltda, localizada em Guarulhos, SP.

Na figura 43 é apresentado, o equipamento para análise através de raio X, utilizando-se um sistema de captação de imagem de fluoroscopia digital, modelo Radioscopic Inspection System DP 432.158HP, onde foi possível obter os níveis reais de porosidade de cada combinação proposta e assim, compará-las com as simulações realizadas nos softwares Magma e Click2Cast.

FIGURA 43 – Equipamento para raio-x.

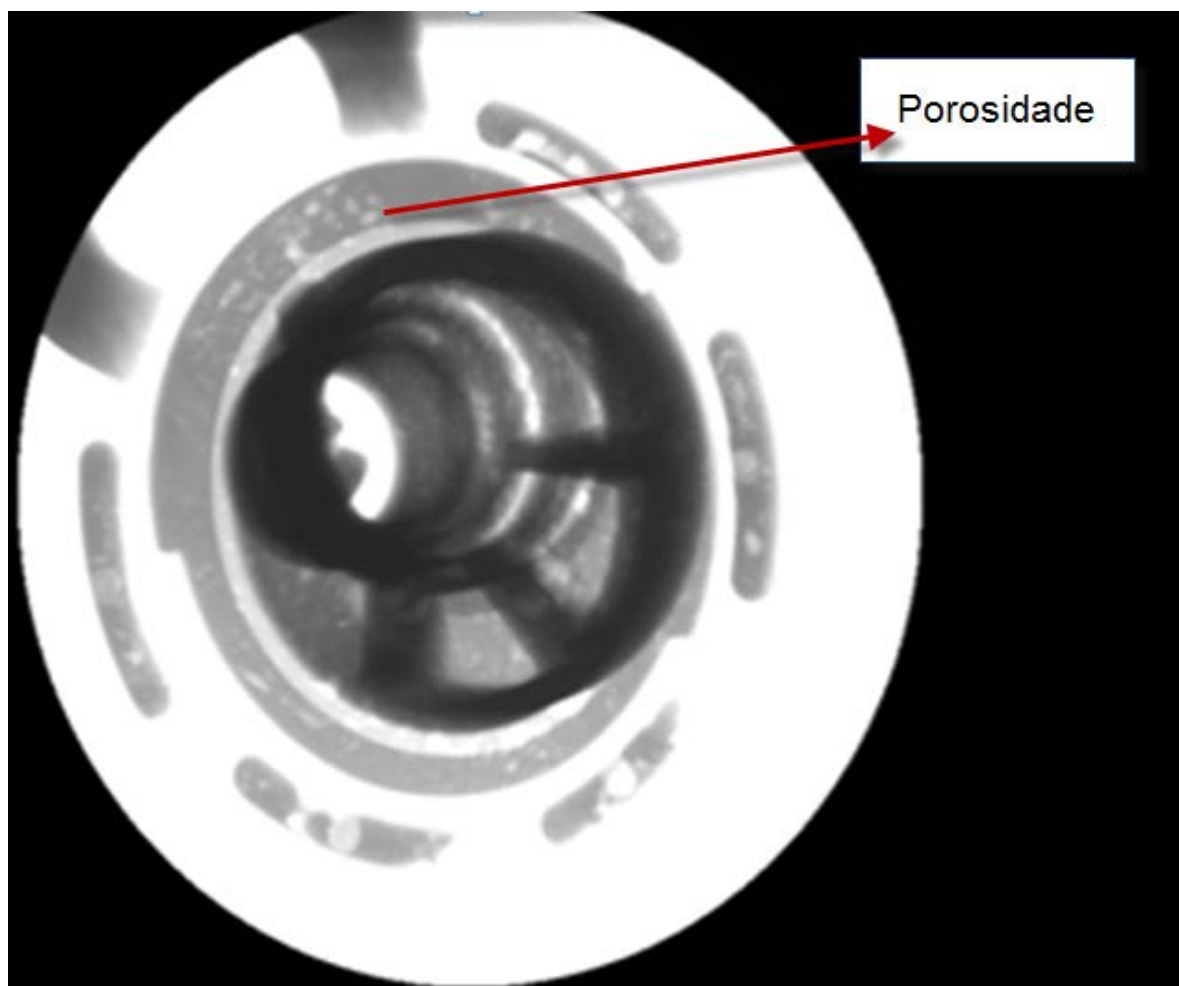


Para analisar o volume e a localização da porosidade, a simulação permite um melhor entendimento quanto à visualização, porém sua limitação está quanto aos dados de pré-processamento que não podem ser simulados, como a evaporação da água e lubrificantes durante o processo de injeção. Já para a análise em equipamento de raio-x, a avaliação é melhor devido estar contemplando o produto real e final, a limitação é quanto a avaliação ser apenas visual sem precisão.

Na figura 44, é apresentada a porosidade obtida através do equipamento de raios X, para a validação de resultados gerados pelo pós-processamento da simulação. Assim foi possível, avaliar com confiabilidade os resultados simulados, perante o produto final injetado através do processo HPDC. É importante destacar

que esse tipo de identificação de porosidade é visual, sendo assim não há precisão na quantidade e tamanho obtido, ou seja, é uma aproximação.

FIGURA 44 – Porosidade detectada através do equipamento do raio-x.



## 5 CONCLUSÃO

O mapeamento do comportamento da porosidade e das possíveis soluções para a sua eliminação, permitem eficiência e economia para a indústria de fundição sob pressão. A principal contribuição dessa pesquisa foi verificar através de simulações e comprovar através de análise de raios X, que o tempo de solidificação é a principal fonte de origem de porosidade em produtos obtidos através do processo HPDC.

As simulações derivadas da análise de fluxo e de solidificação são fundamentais para determinar a probabilidade ou não da ocorrência de porosidade, conclui-se que a velocidade de primeira e a velocidade de segunda fase, são determinantes para a velocidade no canal de alimentação, tempo de preenchimento e tempo de solidificação. Mas a velocidade de primeira e de segunda fase não tem uma relação direta com o comportamento da porosidade, mas sim o tempo de solidificação.

Através dos resultados obtidos das simulações, bem como dados de entrada do processo de injeção do processo HPDC, permitiu a criação de um banco de dados para o desenvolvimento de uma equação matemática que contempla-se todos os parâmetros de injeção sob pressão possíveis pesquisados.

## 6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A realização dessa tese, permite a possibilidade de se realizar novas pesquisas complementares, como:

- Estudar o comportamento da porosidade em função da temperatura, através de diferentes circuitos de refrigeração.
- Estudar o comportamento da porosidade em função dos canais de alimentação, através de diferentes canais.
- Estudar a influência da quantidade de desmoldantes aplicado na superfície da matriz de injeção, durante a extração do produto do molde, como possível fonte de geração de porosidade.
- Estudar a influência da quantidade de lubrificantes na geração de porosidade, quando aplicada de forma excessiva durante o processo de injeção.
- Estudar a equação matemática estatística proposta, através de programação em linguagem computacional.

## REFERÊNCIAS

AMINUL, I., ZOHEIR, N. F., **The Influence of Porosity and Hot Isostatic Pressing Treatment on Wear Characteristics of Cast and P/M Aluminum Alloys**, Department of Process Engineering and Applied Science, Materials Engineering Program, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada B3 J 2X4, 2011.

AMMAR, H. R., SAMUEL, A. M., SAMUEL, F. H., **Porosity and the fatigue behavior of hypoeutectic and hypereutectic aluminum-silicon casting alloys**, International Journal of Fatigue 30 (2008) 1024-1035, Département des Sciences Appliquées, Université: du Québec à Chi, 555, boulevard de l'Université, Chicoutimi, Québec, Canada, 2008.

APELIAN, D., MAKHOUF, M., **High Integrity Aluminum Die Casting (Alloy, Process, Melt Preparation)**, Wheeling, IL: North American Die Casting Association, EUA, 2006.

BREVICK, J., **Die Casting Porosity Guidebook** Wheeling, IL: North American Die Casting Association, EUA, 2009.

CAMARÃO, A. F.; Elementos Finitos: o uso do ANSYS 5.0A na Indústria Automotiva, **Máquinas e Metais**, nº342, Aranda Editora Técnica, pag. 34-49, Brasil, 1994.

CAMPATELLI, G., SCIPPA, A., **A Heuristic Approach to Meet Geometric Tolerance in High Pressure Die Casting**, Department of Mechanical Engineering and Industrial Technologies, University of Firenze – Italy, Via di S. Marta, 3, 50139 Firenze, Italy, 2011.

CAMPBELL, J., **Castings Practice - The 10 Rules of Castings**, Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 200 Wheeler Road, Burlington, MA 01803, ISBN 07506 4791 4, Inglaterra, 2004.

CIMM, [http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/3686-microporosidade#.V4zGgMvrs08](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3686-microporosidade#.V4zGgMvrs08), Brasil, 2016.

CONTE, S. D.; CARL B.; **Elementary Numerical Analysis: An Algorithmic Approach**, McGraw Hill Book Company, 3º ed., New York, EUA, 1980.

DORUM, C., HOPPERSTAD, O. S., BERSTAD, T., DISPINAR, D., **Numerical Modeling of Magnesium Die-Castings Using Stochastic Fracture Parameters**, SINTEF Materials and Chemistry, Trondheim, Norway, Structural Impact Laboratory (SIMLab), Centre for Research-based Innovation, Department for Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2009.

FARIA, G. M., RODRIGUES, T. N., **Análise de Porosidades em Alumínios Injetados: Recuperação de Cabeçotes Automobilísticos Através da Soldagem Tig**, III Congresso Internacional de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento, Brasil, 2014.



HANGAI, Y., KITAHARA, S., AMADA, S., **Pore Defect Control in Die Casting by Compression Loading**, Materials Transactions, Vol. 47, No. 9 (2006) pp. 2363 to 2367, Japan, 2006.

HANGAI, Y., KITAHARA, S., **Quantitative Evaluation of Porosity in Aluminum Die Castings by Fractal Analysis of Perimeter**, Materials Transactions, Vol. 49, No. 4 (2008) pp. 782 to 786, Japan, 2008.

HERMAN T., **Casting Design Tip: Watch out for Heat Traps**. Die Casting Engineer, pp. 24-46, Japan, 2007.

HANGAI, Y., KITAHARA, S., **Quantitative evaluation of porosity in aluminum alloy die castings by fractal analysis of spatial distribution of area**, Materials and Design 30 1169–1173 Department of Mechanical System Engineering, Gunma University, Kiryuu 376-8515, Gundai Co. Ltd., Isesaki 372-0854, Japan, 2009.

IRFAN, M., SCHWAM, D., KARVE, A., RYDER, R., **Improvements of Mechanical Properties in Die Cast Engine Blocks**. 114th Metalcasting Congress, FL: North American Die Casting Association, Orlando, EUA, 2010.

IWATA, Y., DONG, S., SUGIYAMA, Y., IWAHORI, H., **Effects of Solidification Behavior during Filling on Surface Defects of Aluminum Alloy Die Casting**, Materials Transactions, Vol. 54, No. 10 (2013) pp. 1944 to 1950, Japan Foundry Engineering Society, Toyota Central R&D Labs., Inc., Nagakute 480-1192, Japan, 2013.

JIN, C., K., KANG, C., G. **Fabrication by vacuum die casting and simulation of aluminum bipolar plates with micro-channels on both sides for proton exchange membrane (PEM) fuel cells**, Precision Manufacturing System Division, Graduate School, Pusan National University, San 30 Chang Jun-dong, Geum Jung-Gu, Busan 609-735, Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing, School of Mechanical Engineering, Pusan National University, San 30 Jangjeon-dong, Geumjeon-gu, Busan 609-735, South Korea, 2011.

JORSTAD, J.L., APELIAN, D., **High Integrity Die Castings (Sound, Reliable e Heat Treatable)**. Wheeling, IL: North American Die Casting Association, EUA, 2008.

JORSTAD, J., PAN, Q., APELIAN, D., **Interaction of Key Variables During Rheocasting: Effects of Fraction Solid and Flow Velocity on Performance**. 111th Metalcasting Congress. Houston, TX: North American Die Casting Association, EUA, 2007.

KLEIBER, M.; HIEN, T.D.; **The Stochastic Finite Element Method**. Chichester: Wiley. 1992.

KIM, H. H., LEE, S. M., KANG, C. G., **Reduction in Liquid Segregation and Microstructure Improvement in a Semisolid Die Casting Process by Varying Injection Velocity**, The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International,

DOI: 10.1007/s11663-010-9451-8, Pusan National University, Pusan, 609-735 Korea, 2011.

KIM, Y., KANG, C., CHO, J., JEONG, C., CHOI, S., HONG S., **Die Casting Mold Design of the Thin-walled Aluminum Case by Computational Solidification Simulation**. Journal of Materials Science and Technology -shenyang-; 24, 3; 383-388, Japan, 2008.

KITTUR, J. K., CHOUDHARI, M. N., PARAPPAGAUDAR, M. B., **Modeling and Multi-response Optimization of Pressure Die Casting Process Using Response Surface Methodology**, Int J Adv Manuf Technol 77:211–224 DOI 10.1007/s00170-014-6451-x, Springer-Verlag, London, 2014.

KIRKMAN, S., **Shrinkage Porosity: A Guide to Correcting the Problems**. Wheeling, IL: North American Die Casting Association, EUA, 2006.

MALAVAZI, J. **Área de fundição: Processo de fundição sob pressão**. Osasco: SENAI, Brasil, 2005.

MANCIN, S., ZILIO, C., CAVALLINI, A., ROSSETTO, L., **Pressure Drop During Air Flow in Aluminum Foams**, International Journal of Heat and Mass Transfer, Italy, 2012.

MASCENIK, J., **The Evacuation of Pressure Moulds as Progressive Developments of die Casting Process**, Faculty of manufacturing technologies, dept. of technical devices design, Slovakia, 2012.

MENDES, R. P. K. **Avaliação da influência dos parâmetros do processo de fundição sob pressão sobre a qualidade de uma peça injetada em liga de alumínio**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Brasil, 2005.

MIDSON, S., **Using the Scanning Electron Microscope for Defect Characterization**. Die Casting Engineer, pp. 28-30, 2008.

MILLER, R., **An Extension to PQ Analysis: Selecting Die and Machine to Quantitatively Maximize Operating Flexibility**. CastExpo'10, FL: North American Die Casting Association, Orlando, EUA, 2010.

MONROE, A., **Modeling of Shinkage Porosity in High Pressure Aluminum Die Castings**. Wheeling, IL: North American Die Casting Association, EUA, 2009.

NOORUDDIN, A. H., ANIFOWOSE, F., ABDULRAHEEM, A., **Using Soft Computing Techniques to Predict Corrected Air Permeability Using Thomeer Parameters, Air Porosity and Grain Density**, Computers & Geosciences 64 (2014) 106-80, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia, 2014.

NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, **Die Materials & Technologies. Wheeling, IL:** North American Die Casting Association, EUA, 2011.

NORTH AMERICAN DIE CASTING ASSOCIATION, **NADCA Product Specification Standards for Die Casting. Wheeling, IL:** North American Die Casting Association, EUA, 2009.

PROSKE, M., GADDAM, D., **Autonomous Optimization: Determining the Process Window before Casting the First Part. Die Casting Engineer, North American Die Casting Assn.** Die Casting Engineer; 53, 3; 22-25., EUA, 2009.

REIKHER, A., PILLAI, K. M., **A Fast Simulation of Transient Metal Flow and Solidification in a Narrow channel.Part II. Model Validation and Parametric Study**, International Journal of Heat and Mass Transfer 60 (2013) 806–815, Albany-Chicago LLC, 7816 N. Regent Rd. Fox Point, WI 53217, Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, WI 53211, EUA, 2013.

ROBBINS, P., **Vacuum Assisted Casting Answers Today's Market Needs – Vacuum Makes Possible the Bigger, More Complex Castings Now Wanted by Automakers**, Castool Tooling Systems, ON, Canada, 2012.

SCHNEIDERBAUER, S., PIRKER, S., CHIMANI, C., KRETZ, R., **Studies on Flow Characteristics at High-Pressure Die-Casting**, The 3rd International Conference on Advances in Solidification Processes, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 27 (2011) 012067, Austria, 2011.

SHOLAPURWALLA, S., & MATHIER, V., **Optimizing the High Pressure Die Casting Process Using Computer Simulation**; CastExpo'10. Orlando, FL: North American Die Casting Association, EUA, 2010.

STEEDMAN, G., BISHOP, D. P., CALEYW. F., KIPOUROS, G. J., **Surface porosity investigation of aluminum-silicon PM alloys**, Materials Engineering Program, Department of Process Engineering and Applied Science, Dalhousie University, 1459 Oxford Street, Halifax, NS, Canada, 2012.

TENG, X., MAE, H., BAI, Y., WIERZBICKI, T., **Pore Size and Fracture Ductility of Aluminum Low Pressure Die Casting**, Impact and Crashworthiness Lab, Room 5-218, 77 Massachusetts Avenue, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA 4630 Shimotakanezawa, Haga-machi, Haga-gun, Tochigi 321-3393, Honda R&D Co. Ltd., Japan, 2009.

TSOUKALAS, V. D. **Optimization of Porosity Formation in AlSi9Cu3 Pressure Die Castings Using Genetic Algorithm Analysis.** Materials and Design, Department of Marine Engineering, Athens Merchant Marine Academy, Paralia Aspropyrgou 19300, Aspropyrgos, Athens, Greece, 2008.

UDDANWADIKER, R. V.; PADOLE, P. M.; ARYA, H.; **Effect of Variation of Root Post in Different Layers of Tooth: Linear vs Nonlinear Finite Element Stress Analysis**, Journal Biosci Bioeng; 104: 363-70, 2007.

UGURAL, A. C.; FENSTER, S.K.; **Advanced Strength and Applied Elasticity**, The SI version. London, Elsevier Science Publishing Co. Inc., 1981.

VANDERESSE, N., MAIRE, E., CHABOD, A., BUFFIÈRE, J., **Microtomographic study and finite element analysis of the porosity harmfulness in a cast aluminum alloy**, International Journal of Fatigue 33 (2011) 1514–1525, Université de Lyon, INSA-Lyon, MATEIS CNRS UMR 5510, 69621 Villeurbanne, Centre Technique des Industries de la Fonderie (CTIF), France, 2011.

VINARCIK, E. J., **High Integrity Die Casting Processes**, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, Includes index, ISBN 0-471-20131-6, die-casting. I. Title. TS239.V56 671.2 53 dc21, Canada, 2002.

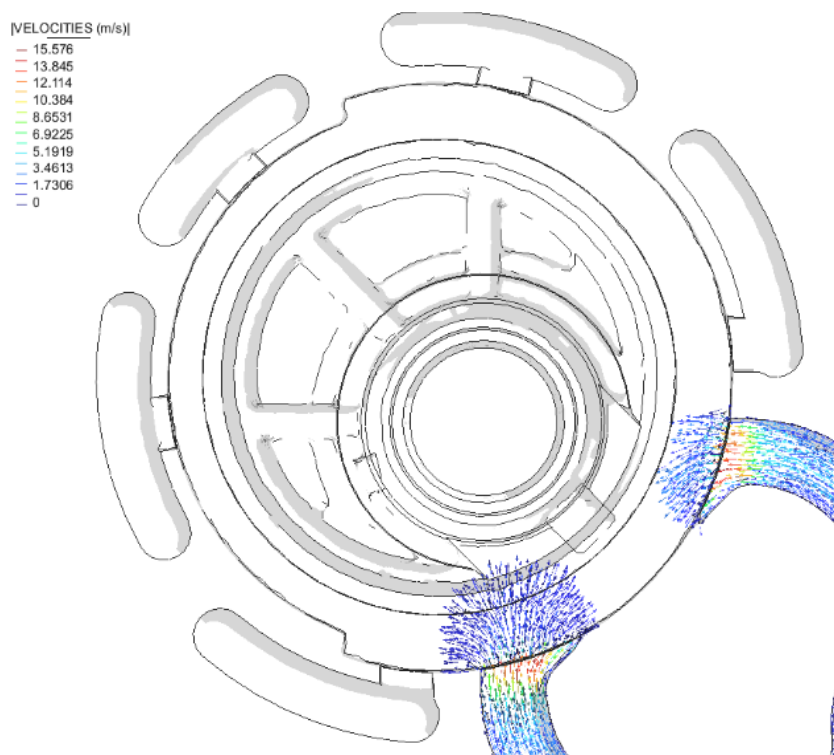
WANNARUMON, S., ACTIS, M., **Comparisons of Computer Fluid Dynamic Software Programs applied to Jewelry Investment Casting Process**, World Academy of Science, Engineering and Technology 55, EUA, 2009.

WILCZEK, A., DŁUGOSZ, P., HEBDA, M., **Porosity Characterization of Aluminum Castings by Using Particular Non-destructive Techniques**, J Nondestruct Eval (2015) 34:26 DOI 10.1007/s10921-015-0302-z, Institute of Materials Engineering, Cracow University of Technology, Warszawska 24, 31-155 Kraków, Polonium, 2015.

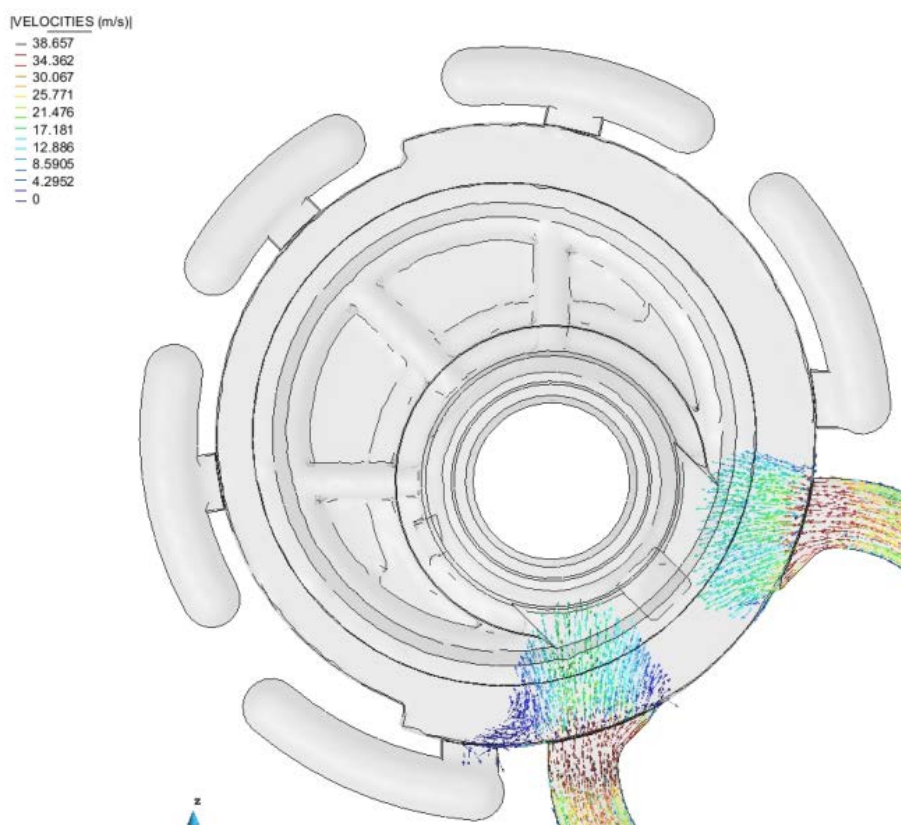
ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; **The Finite Element Method**, (5th ed.), Vol. 2 – Solid Mechanics. Butterworth-Heinemann: Oxford, EUA, 2000.

ZUO, Y., LI, H., XIA, M., JIANG, B., SCAMANS, G. M., FAN, Z., **Refining Grain Structure and Porosity of an Aluminum Alloy With Intensive Melt Shearing**, LIME (EPSRC Centre for Innovative Manufacturing in Liquid Metal Engineering), BCAST, Brunel University, Uxbridge, Middlesex UB8 3PH, Reino Unido, 2010.

## APÊNDICE 1 - DISTRIBUIÇÃO DE VELOCIDADE



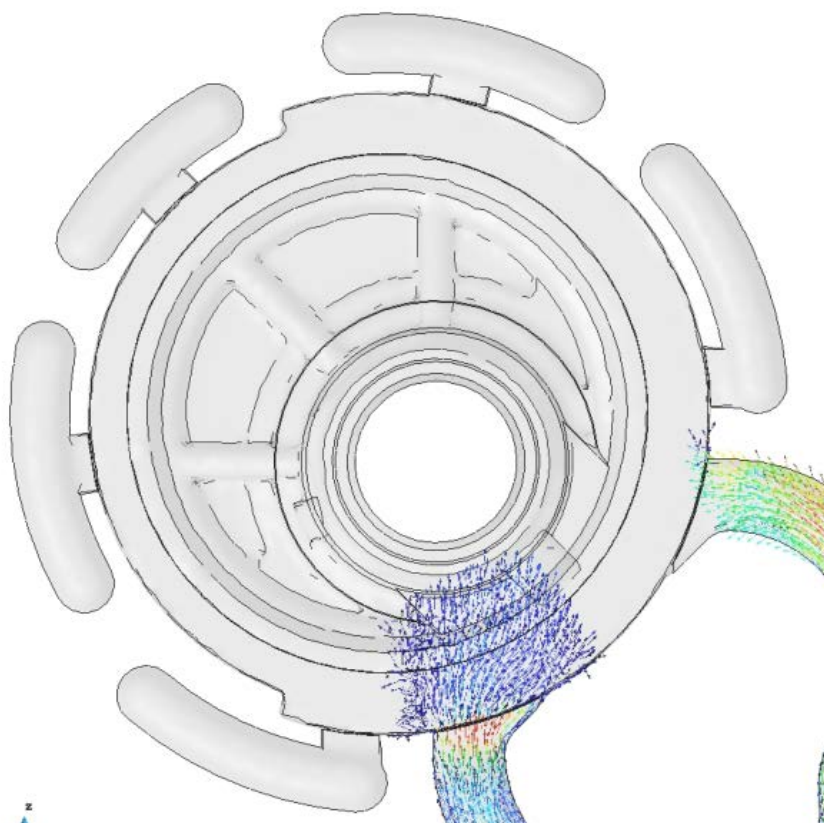
Velocidade de primeira fase= 15%; Velocidade de segunda fase= 5%



Velocidade de primeira fase= 15%; Velocidade de segunda fase= 50%

[VELOCITIES (m/s)]

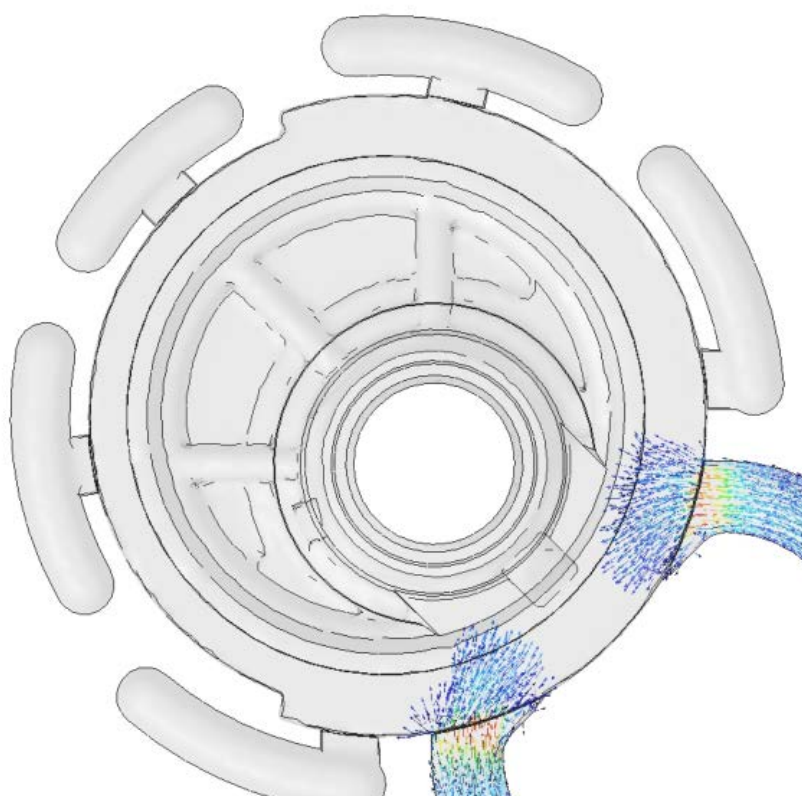
58.147  
51.686  
45.225  
38.764  
32.304  
25.843  
19.382  
12.921  
6.4607  
0



Velocidade de primeira fase= 15%; Velocidade de segunda fase= 100%

[VELOCITIES (m/s)]

30.794  
27.372  
23.951  
20.529  
17.108  
13.686  
10.265  
6.843  
3.4215  
0

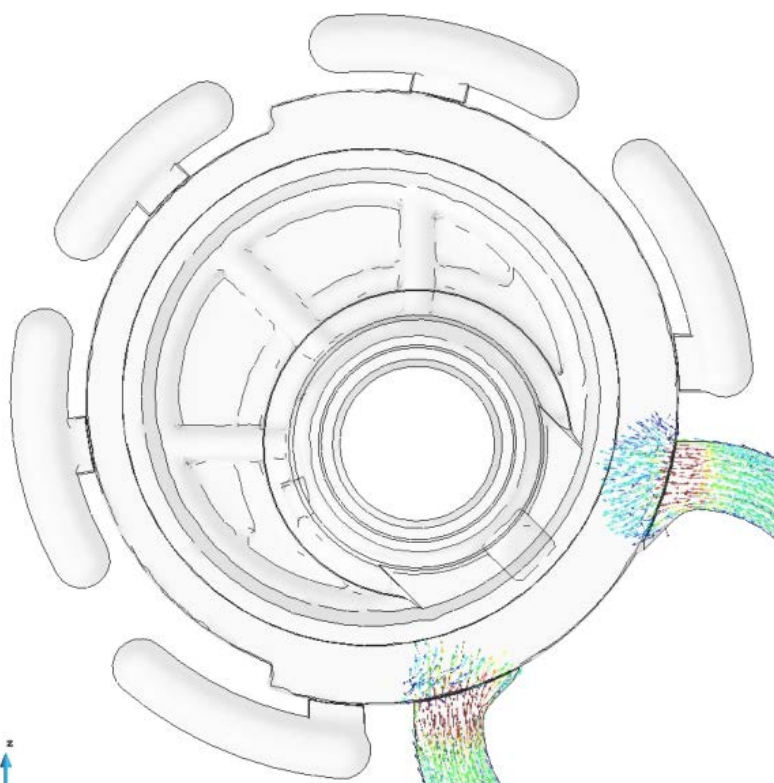


Velocidade de primeira fase= 50%; Velocidade de segunda fase= 5%



[VELOCITIES (m/s)]

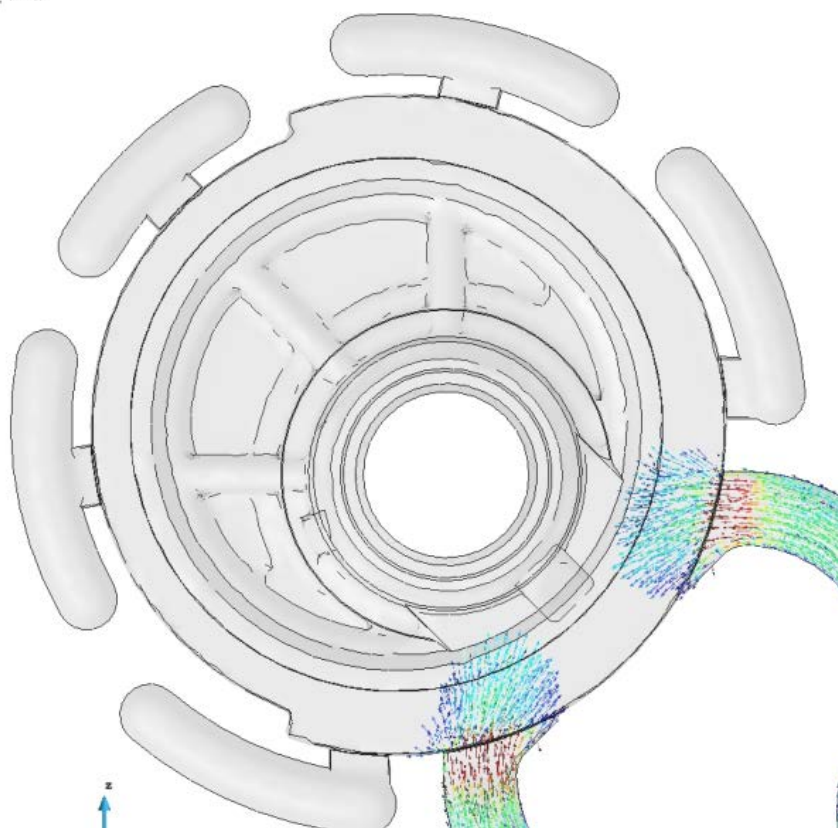
64.256
57.116
49.977
42.837
35.698
28.558
21.419
14.279
7.1395
0



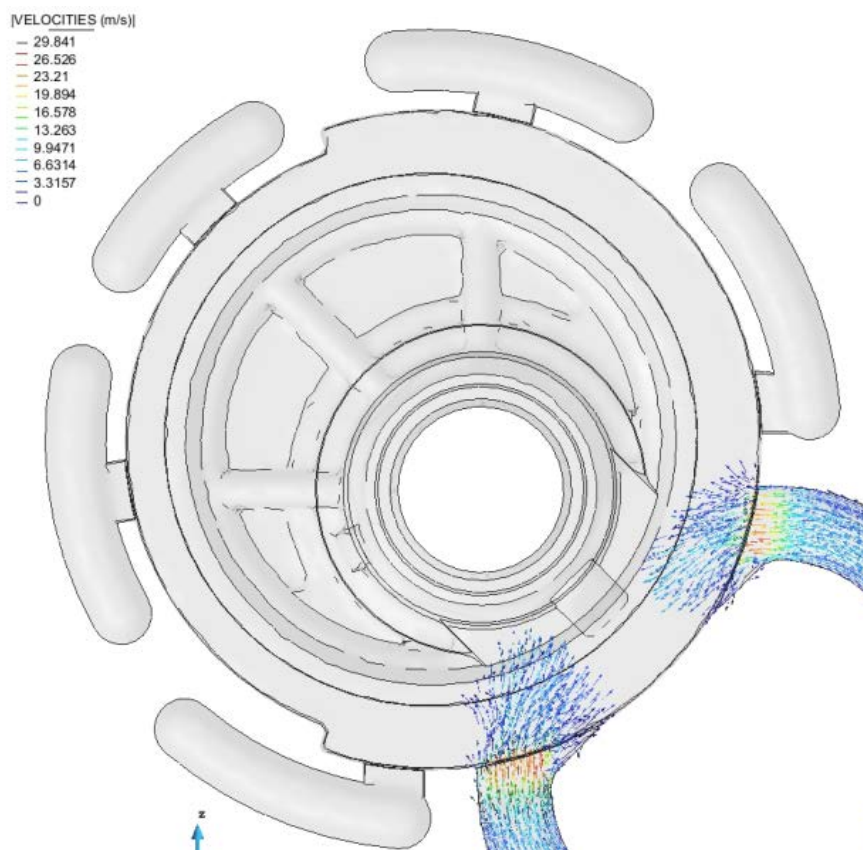
Velocidade de primeira fase= 50%; Velocidade de segunda fase= 50%

[VELOCITIES (m/s)]

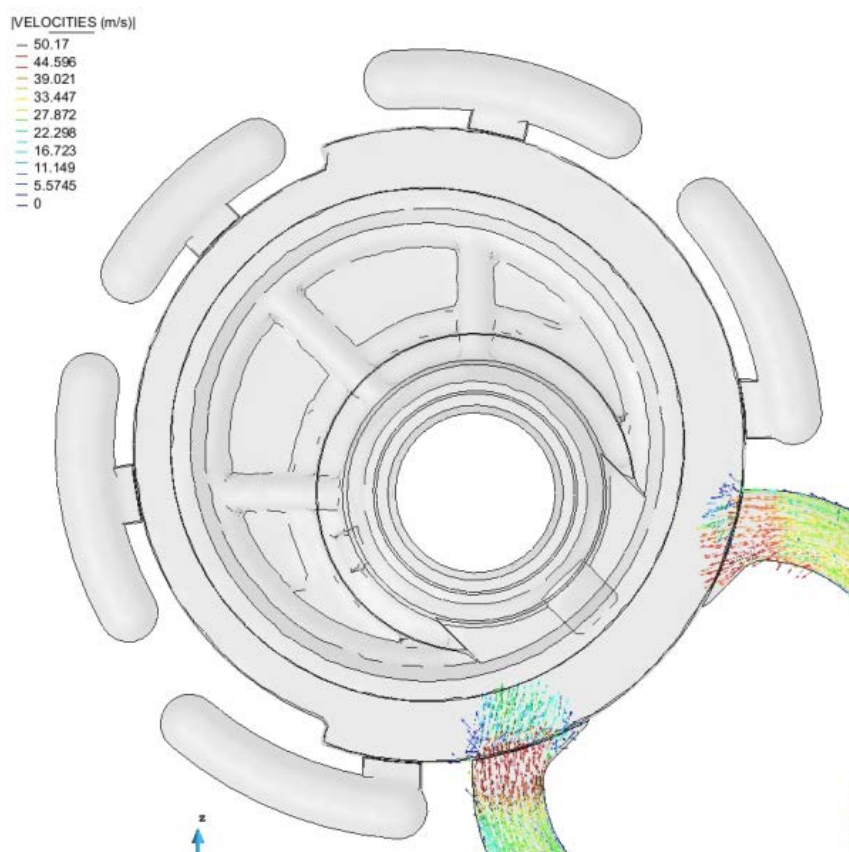
71.796
63.819
55.841
47.864
39.887
31.909
23.932
15.955
7.9773
0



Velocidade de primeira fase= 50%; Velocidade de segunda fase= 100%

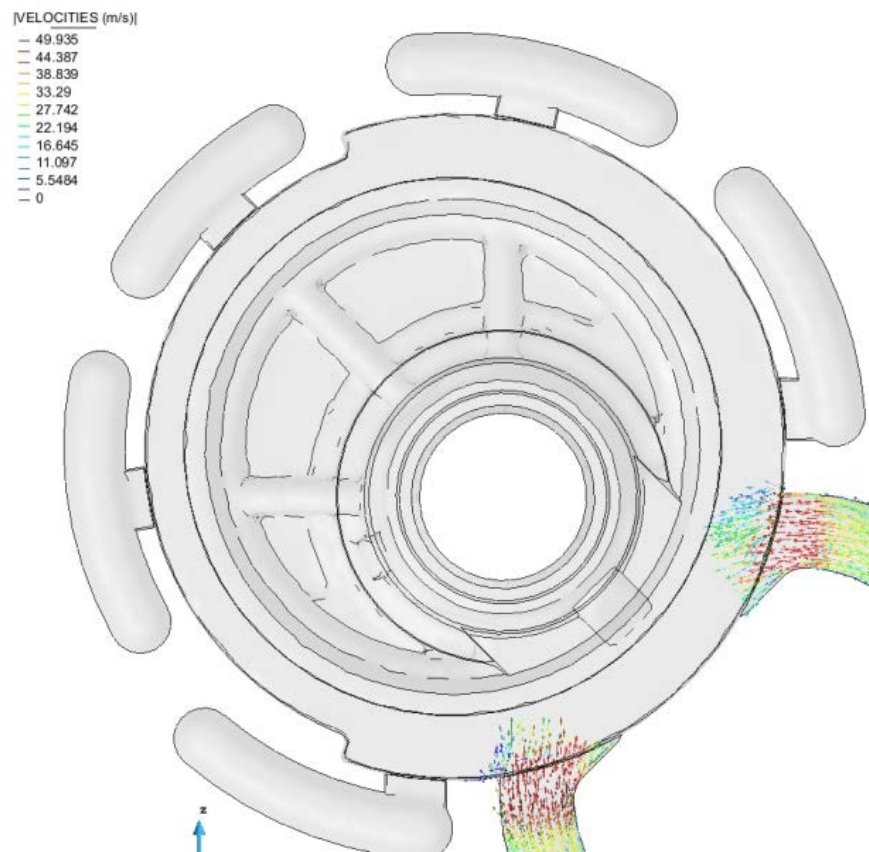


Velocidade de primeira fase= 100%; Velocidade de segunda fase= 5%



Velocidade de primeira fase= 100%; Velocidade de segunda fase= 50%

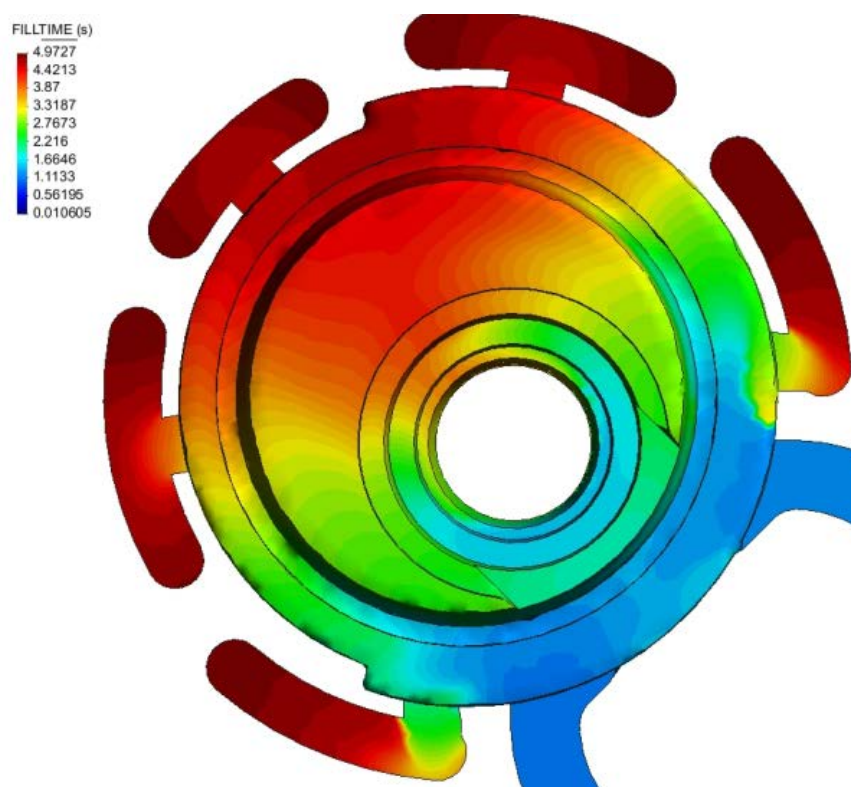




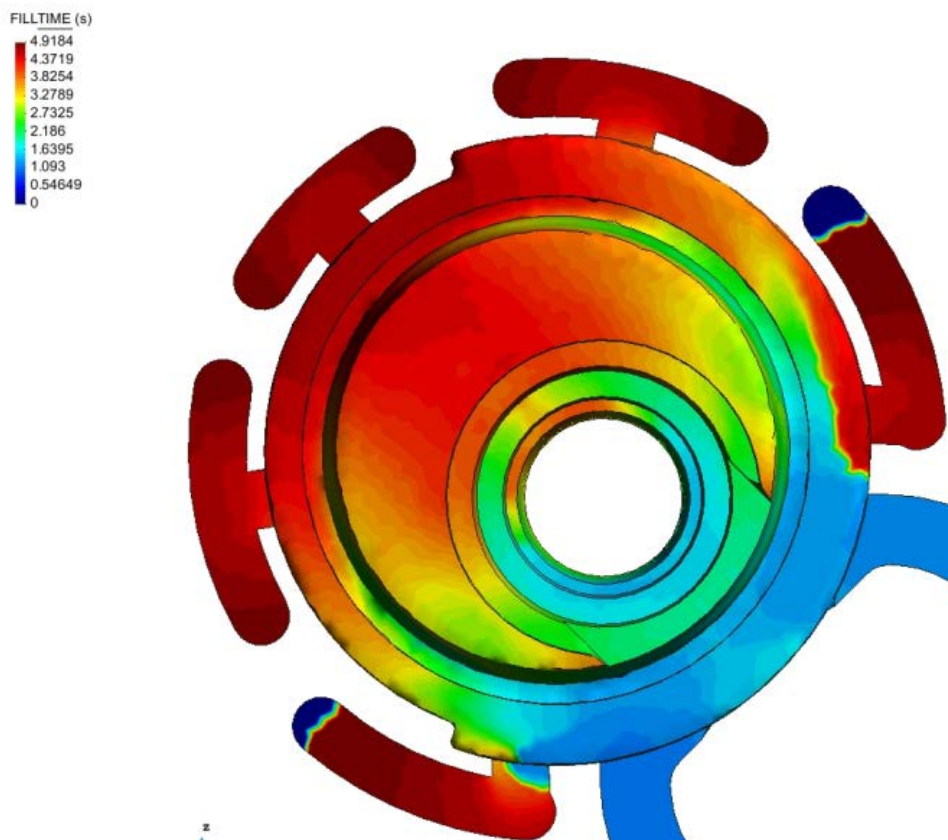
Velocidade de primeira fase= 100%; Velocidade de segunda fase= 100%

## APENDICE 2 – TEMPO DE PREENCHIMENTO

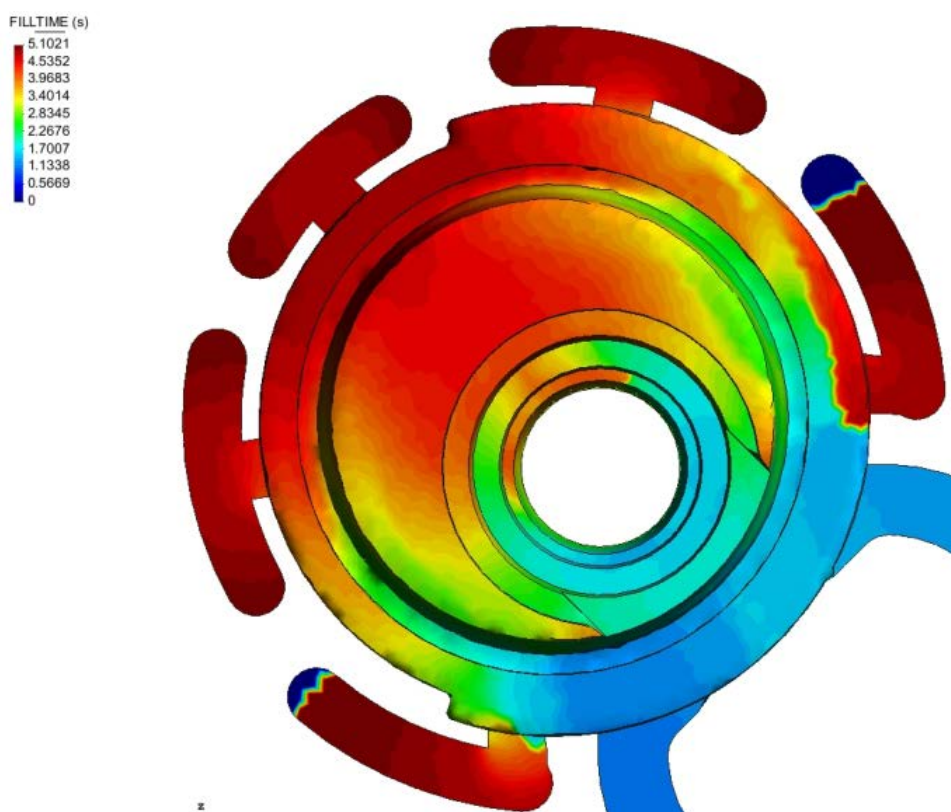
Velocidade 1° fase (m/s)	Velocidade 2° fase (m/s)	Velocidade no ataque (m/s)
0,03	0,58	11,282
0,03	3,57	86,106
0,03	4,20	101,16
0,26	0,58	22,687
0,27	3,20	81,354
0,26	4,01	101,19
0,28	0,82	14,832
0,28	2,81	56,622
0,29	3,15	42,855



Velocidade de primeira fase= 15%; Velocidade de segunda fase= 5%



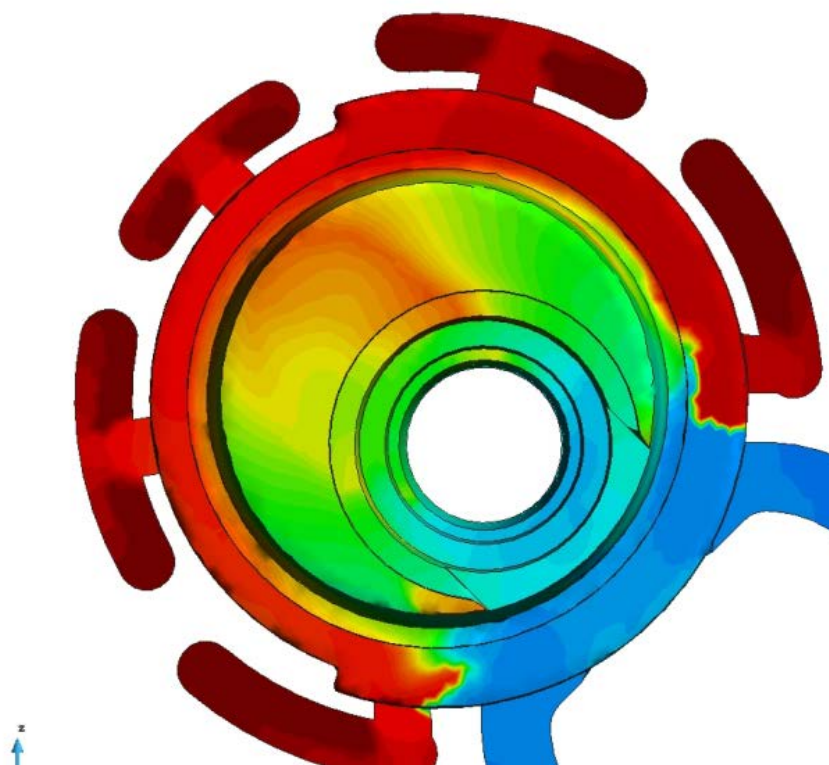
Velocidade de primeira fase= 15%; Velocidade de segunda fase= 50%



Velocidade de primeira fase= 15%; Velocidade de segunda fase= 100%

FILLTIME (s)

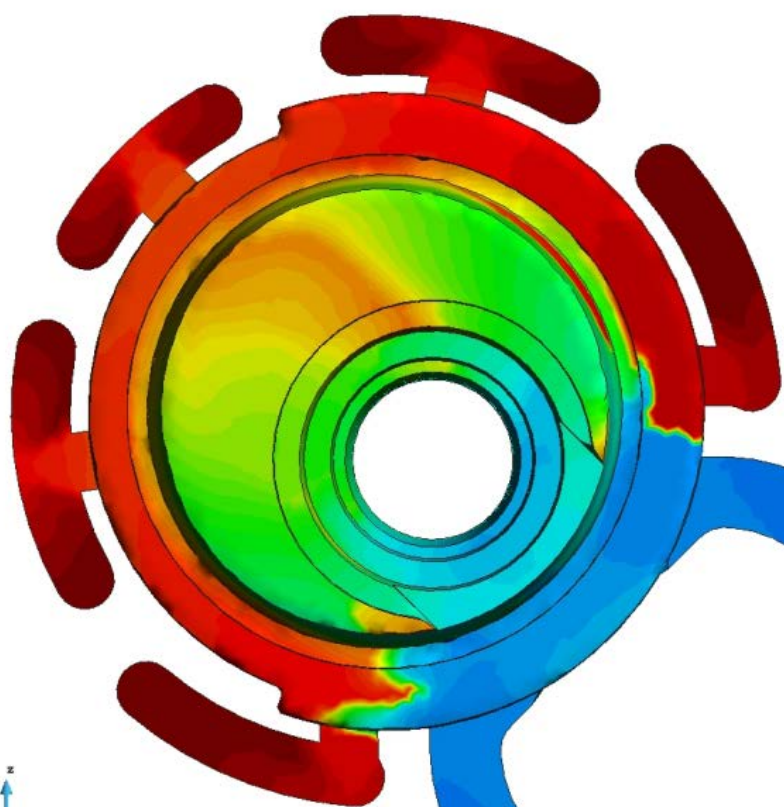
0.49797
0.44275
0.38754
0.33232
0.2771
0.22188
0.16666
0.11144
0.056226
0.0010075



Velocidade de primeira fase= 50%; Velocidade de segunda fase= 5%

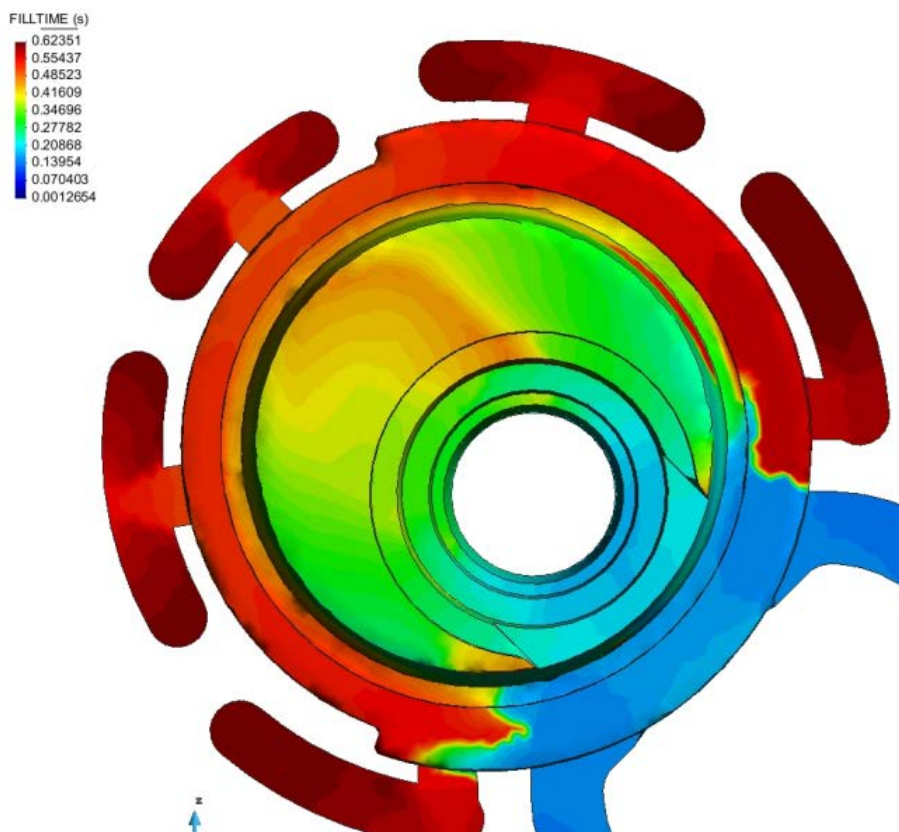
FILLTIME (s)

0.55594
0.49429
0.43265
0.371
0.30936
0.24771
0.18607
0.12442
0.062774
0.0011285

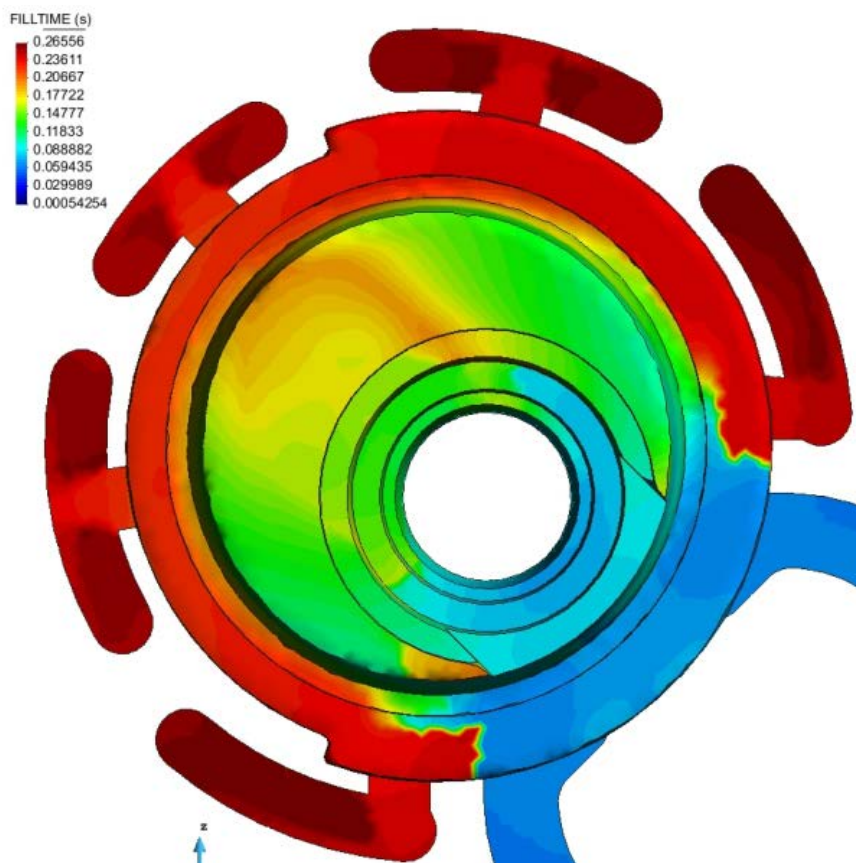


Velocidade de primeira fase= 50%; Velocidade de segunda fase= 50%

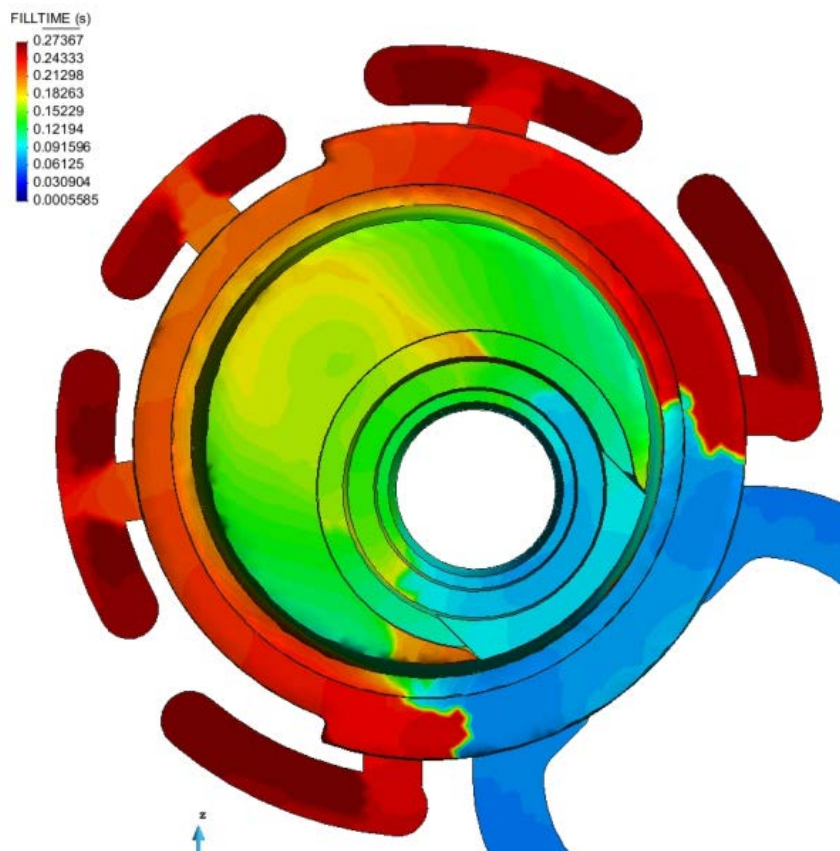




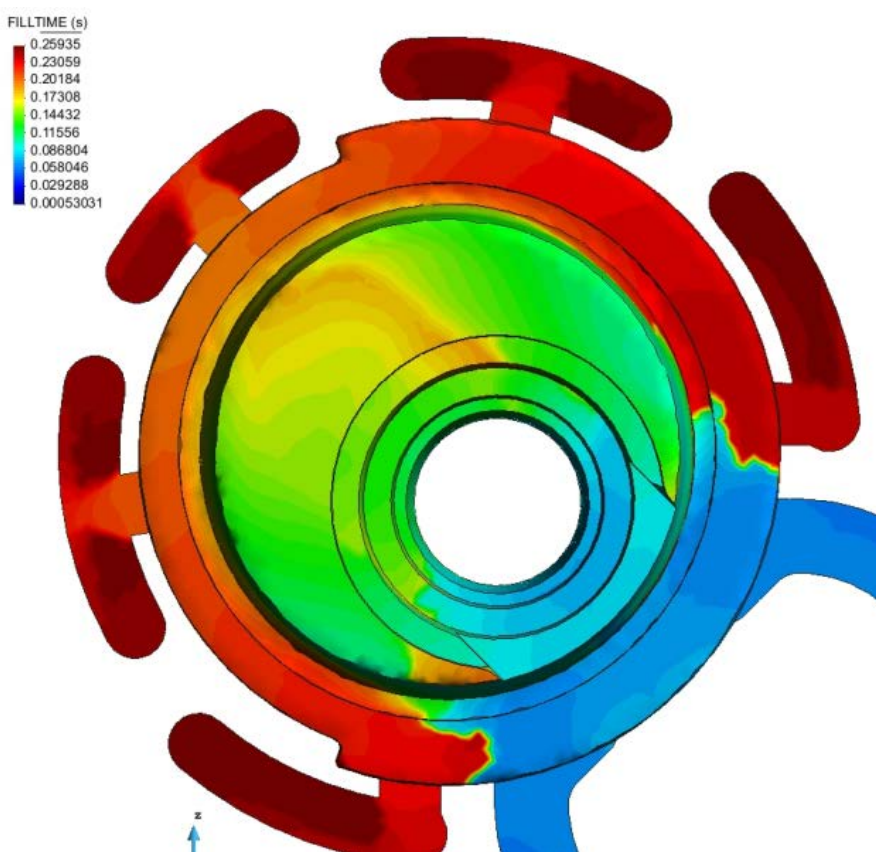
Velocidade de primeira fase= 50%; Velocidade de segunda fase= 100%



Velocidade de primeira fase= 100%; Velocidade de segunda fase= 5%



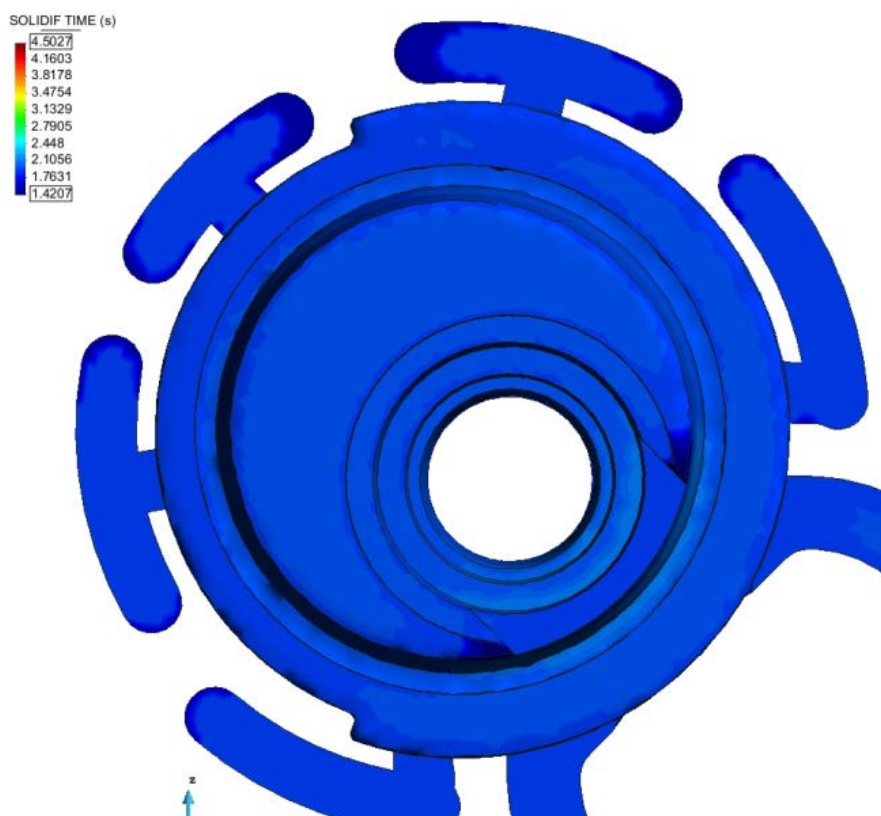
Velocidade de primeira fase= 100%; Velocidade de segunda fase= 50%



Velocidade de primeira fase= 100%; Velocidade de segunda fase= 100%

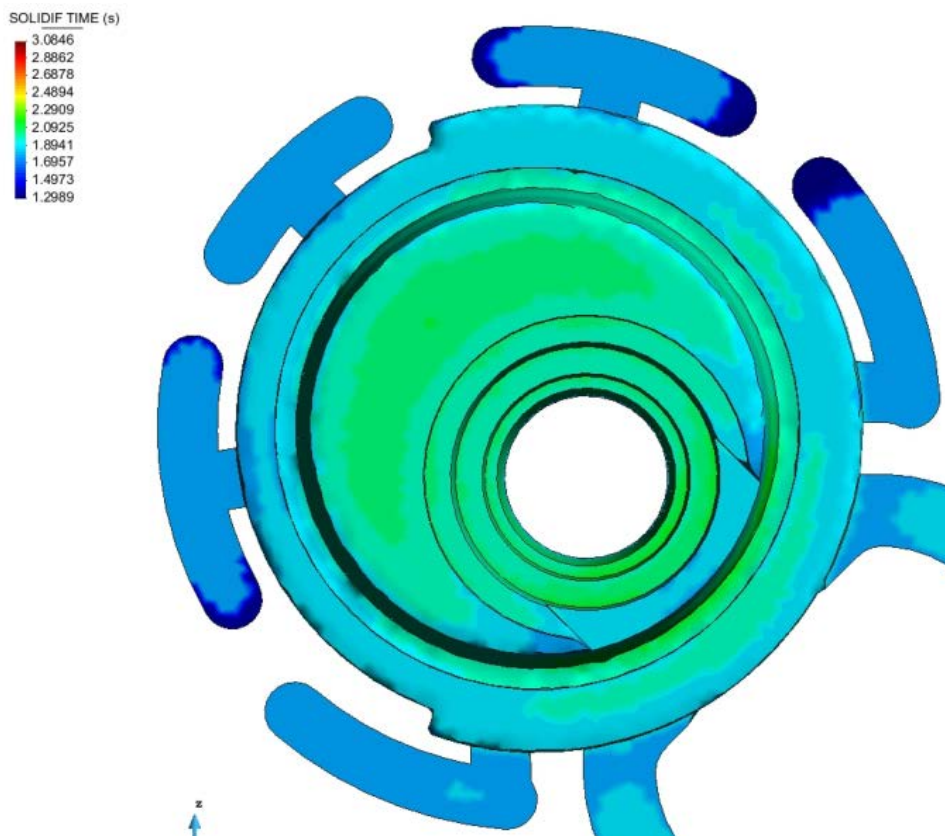
### APENDICE 3 – TEMPO DE SOLIDIFICAÇÃO

Velocidade 1° fase (m/s)	Velocidade 2° fase (m/s)	Tempo de preenchimento (s)
0,03	0,58	11,282
0,03	3,57	86,106
0,03	4,20	101,16
0,26	0,58	22,687
0,27	3,20	81,354
0,26	4,01	101,19
0,28	0,82	14,832
0,28	2,81	56,622
0,29	3,15	42,855

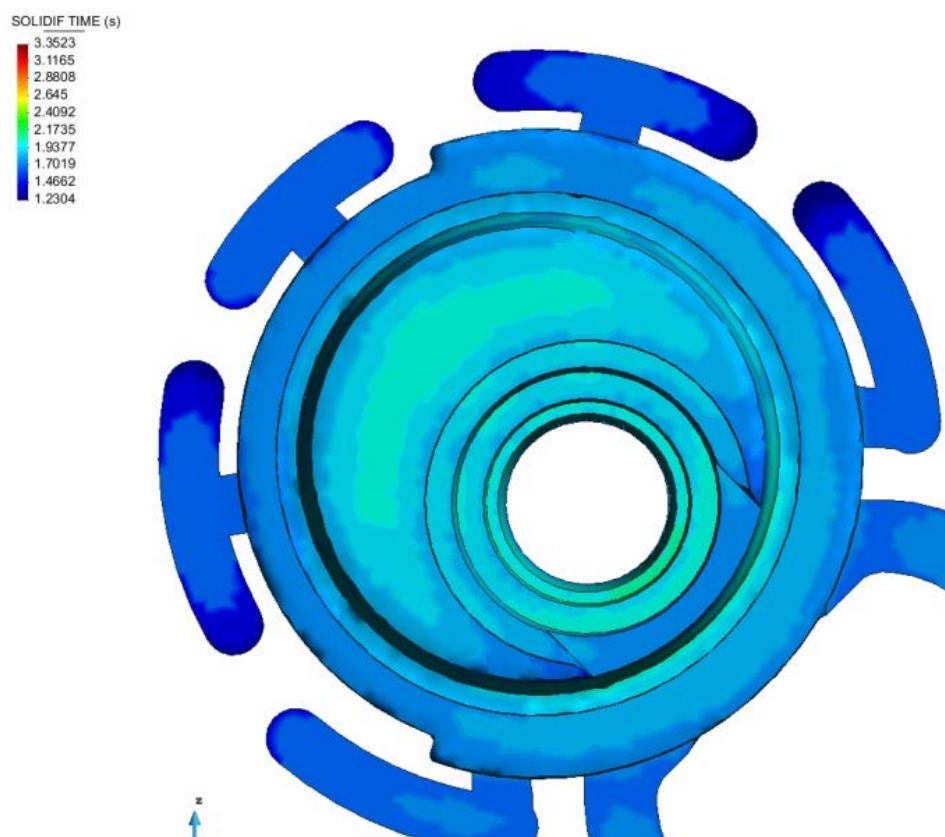


Velocidade de primeira fase= 15%; Velocidade de segunda fase= 5%





Velocidade de primeira fase= 15%; Velocidade de segunda fase= 50%



Velocidade de primeira fase= 15%; Velocidade de segunda fase= 100%



SOLIDIF TIME (s)

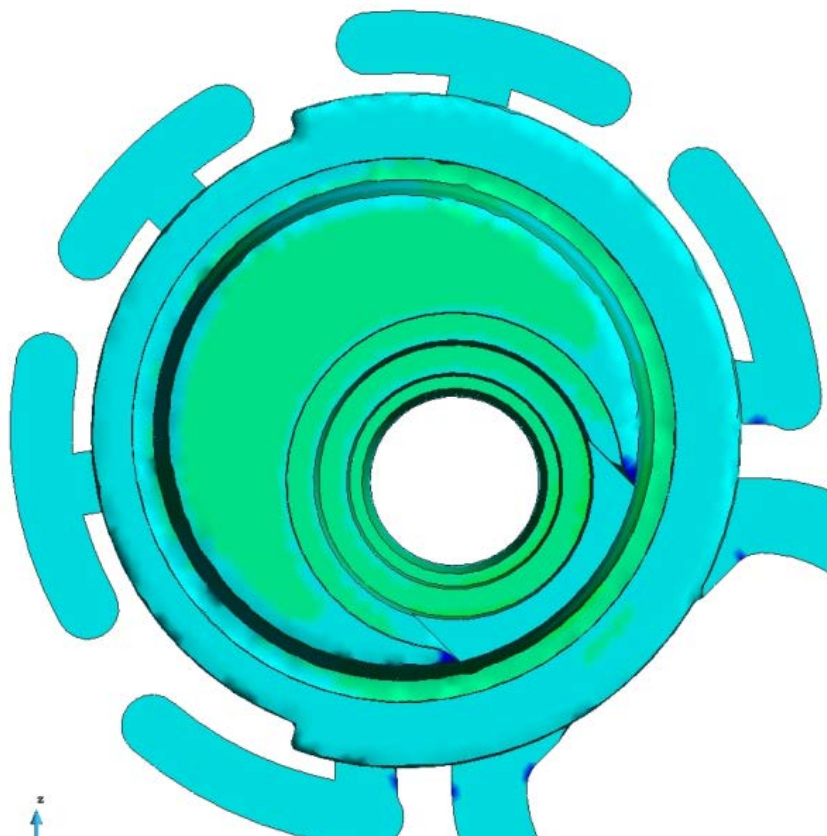
3.3116
2.983
2.6544
2.3258
1.9972
1.6686
1.34
1.0114
0.68284
0.35425



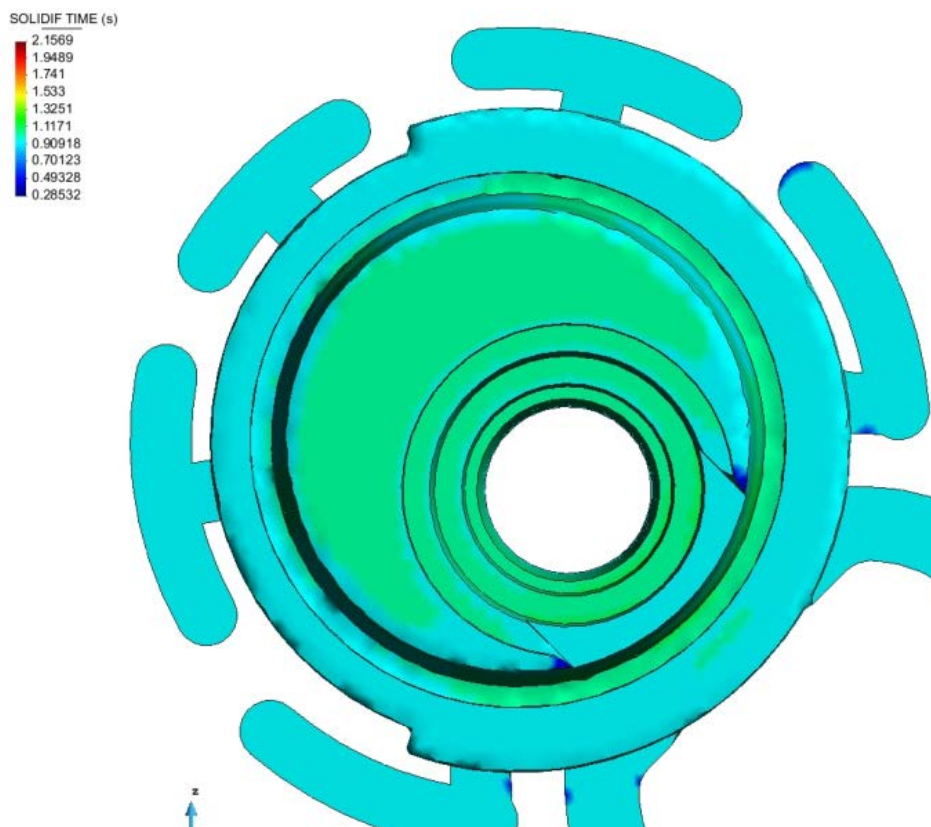
Velocidade de primeira fase= 50%; Velocidade de segunda fase= 5%

SOLIDIF TIME (s)

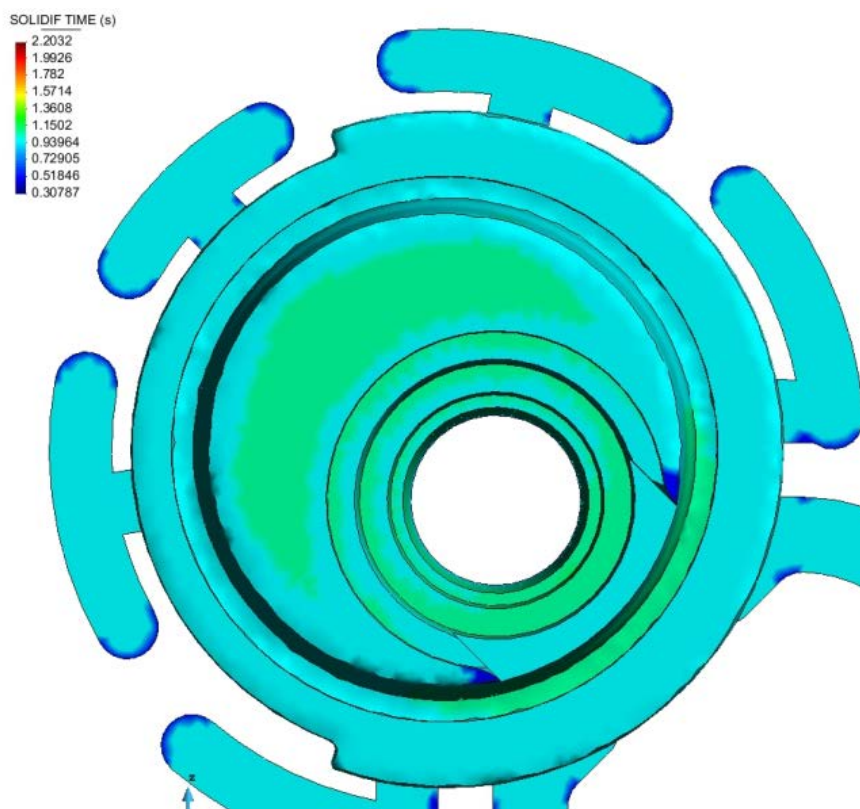
2.1432
1.9347
1.7263
1.5179
1.3094
1.101
0.89256
0.68413
0.47569
0.26725



Velocidade de primeira fase= 50%; Velocidade de segunda fase= 50%



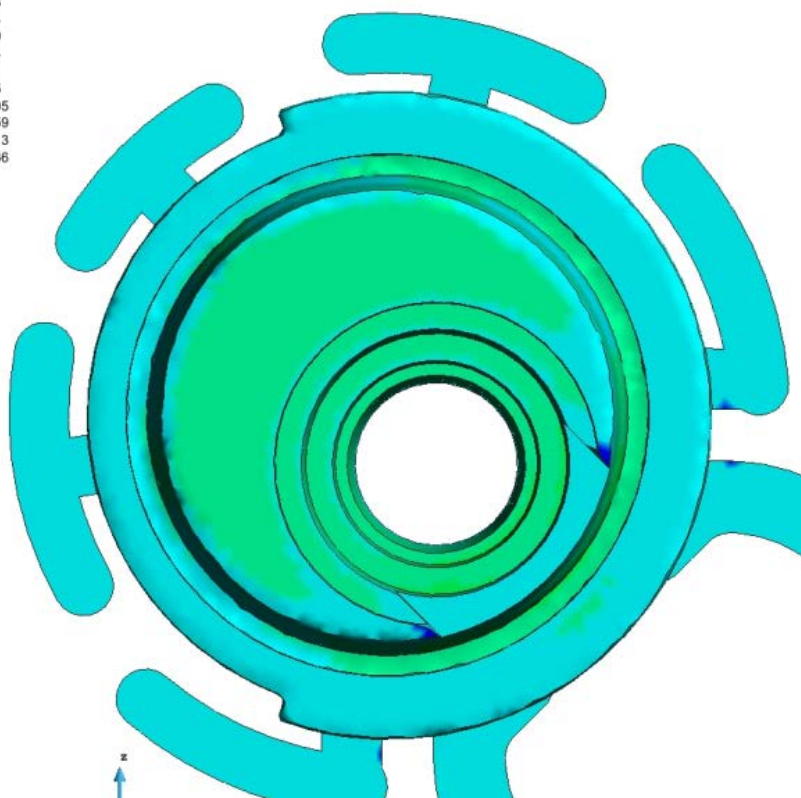
Velocidade de primeira fase= 50%; Velocidade de segunda fase= 100%



Velocidade de primeira fase= 100%; Velocidade de segunda fase= 5%

SOLIDIF TIME (s)

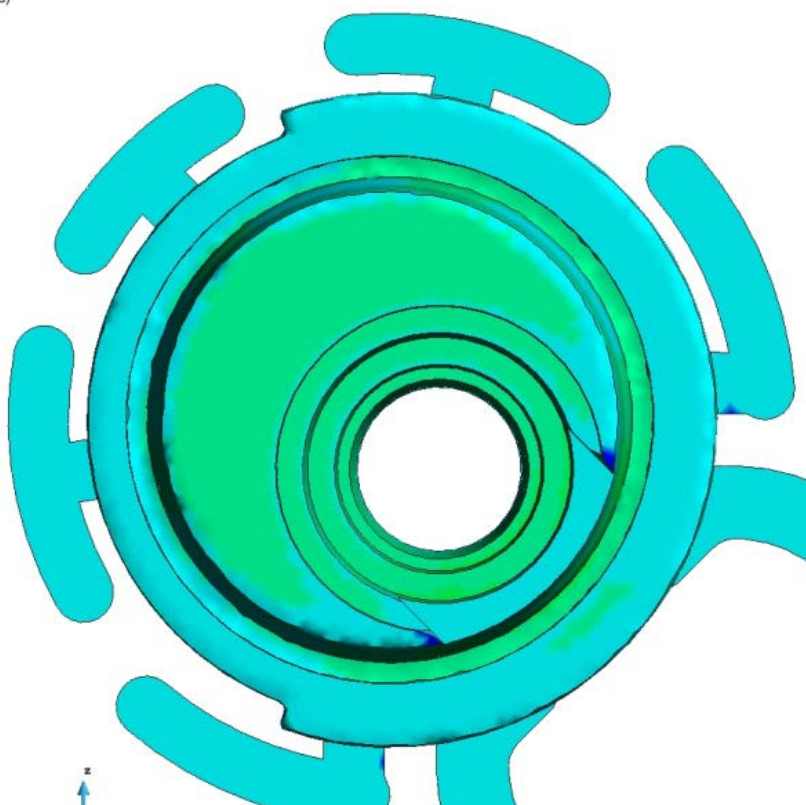
2.0768
1.9684
1.6599
1.4514
1.243
1.0345
0.82605
0.61759
0.40913
0.20066



Velocidade de primeira fase= 100%; Velocidade de segunda fase= 50%

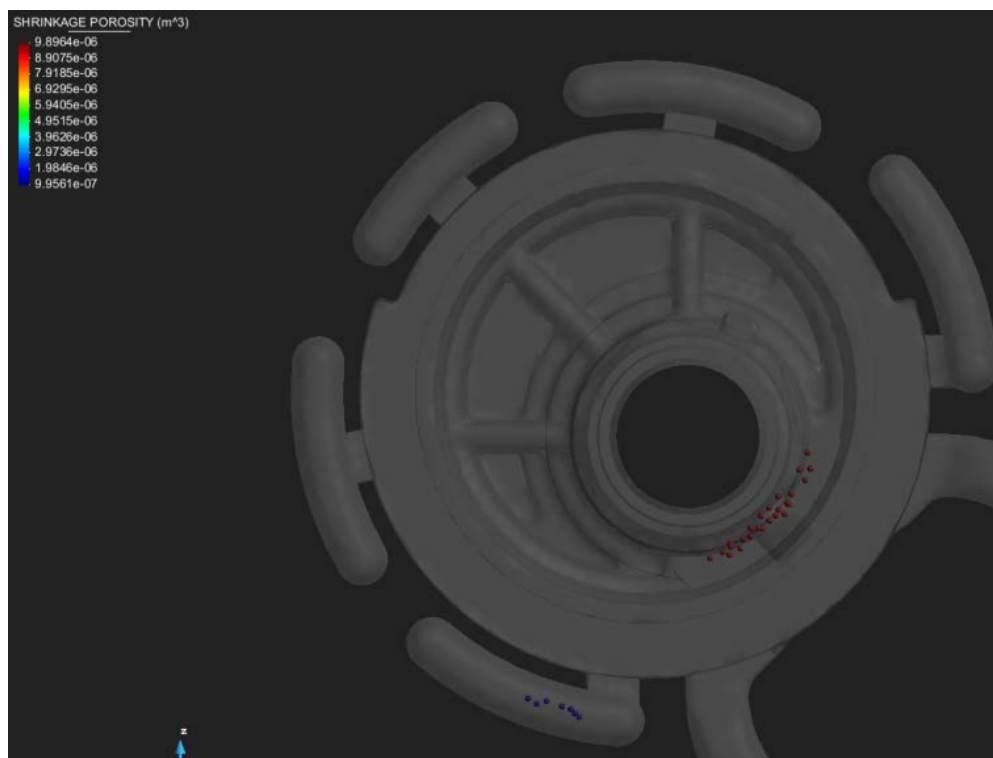
SOLIDIF TIME (s)

2.0549
1.8482
1.6415
1.4348
1.2281
1.0214
0.81471
0.608
0.4013
0.19459

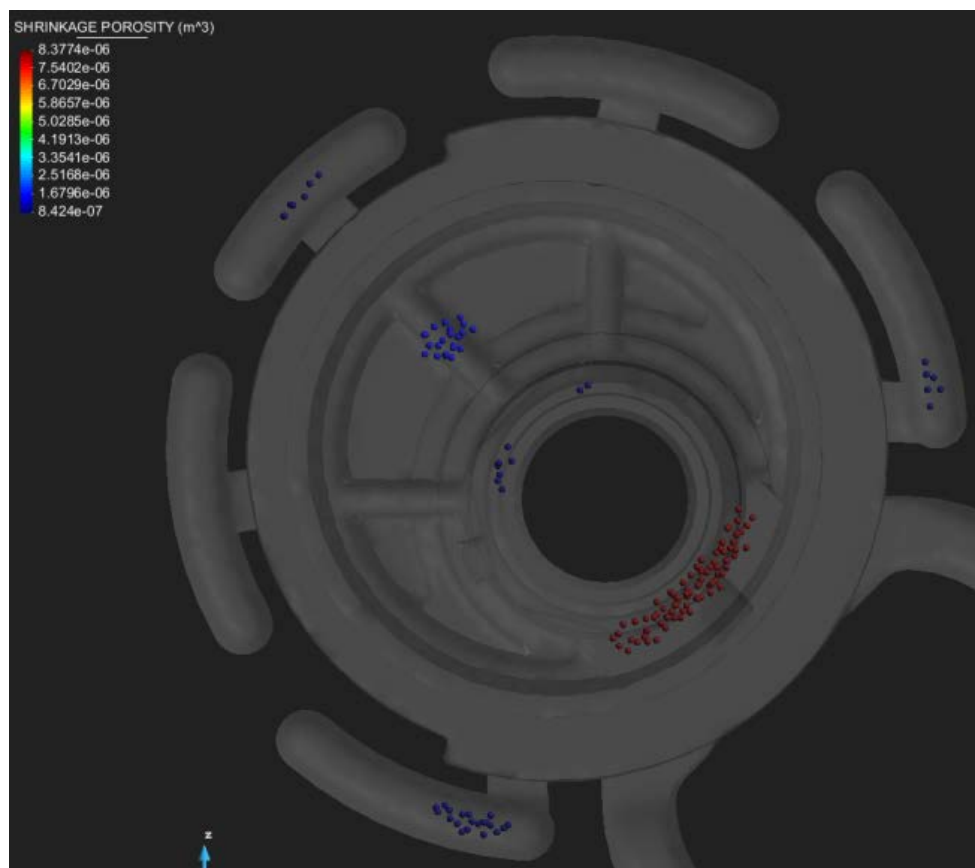


Velocidade de primeira fase= 100%; Velocidade de segunda fase= 100%

## APENDICE 4 - POROSIDADE

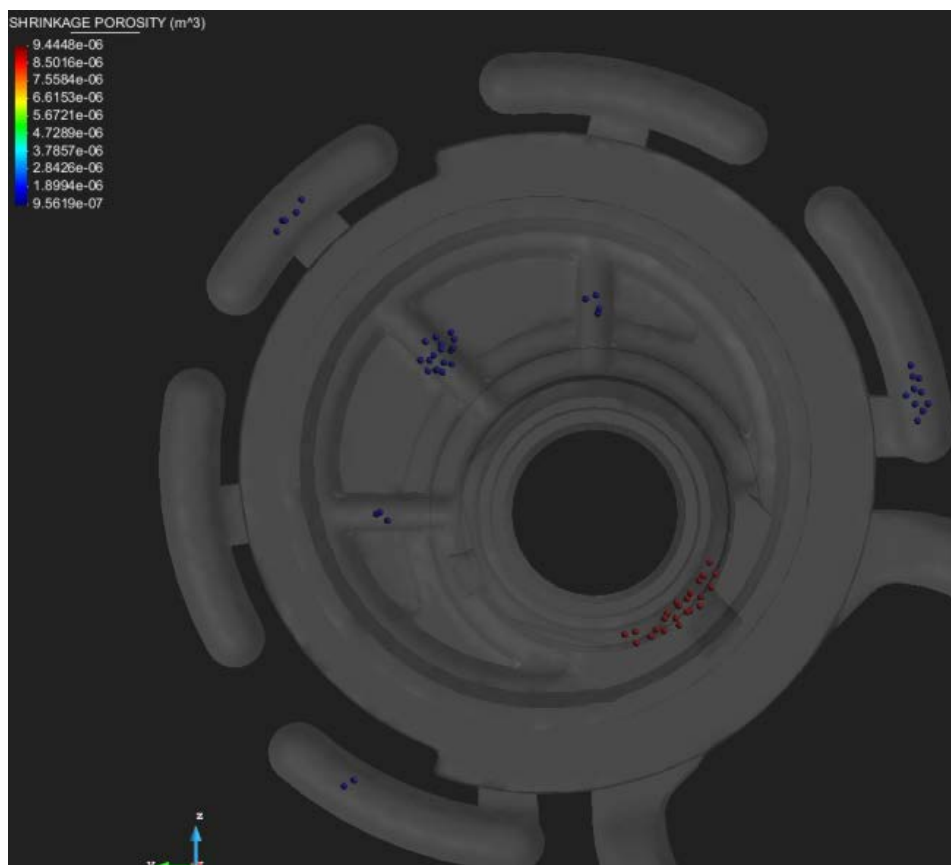


Velocidade de primeira fase= 15%; Velocidade de segunda fase= 5%

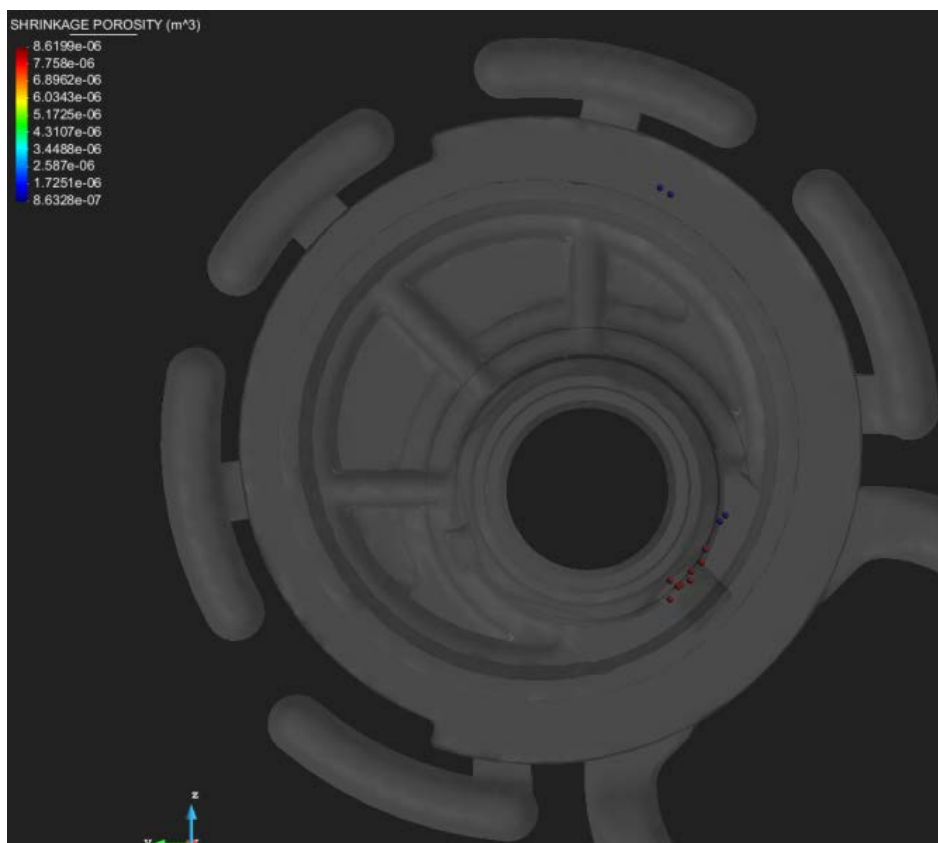


Velocidade de primeira fase= 15%; Velocidade de segunda fase= 50%

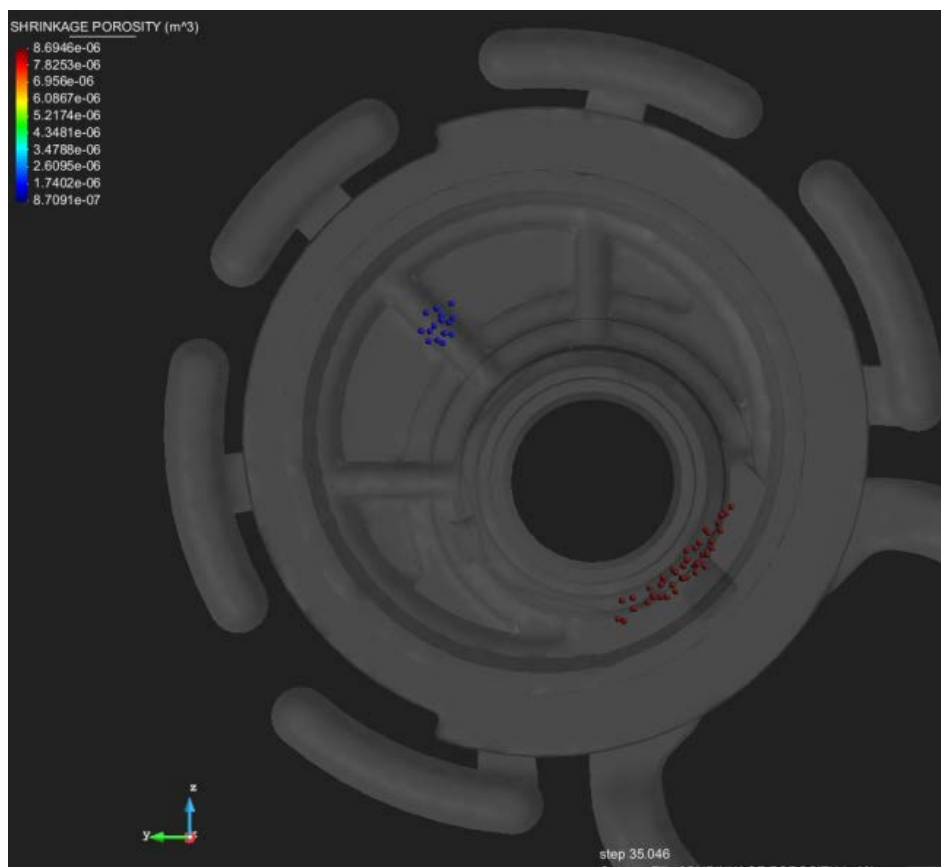




Velocidade de primeira fase= 15%; Velocidade de segunda fase= 100%



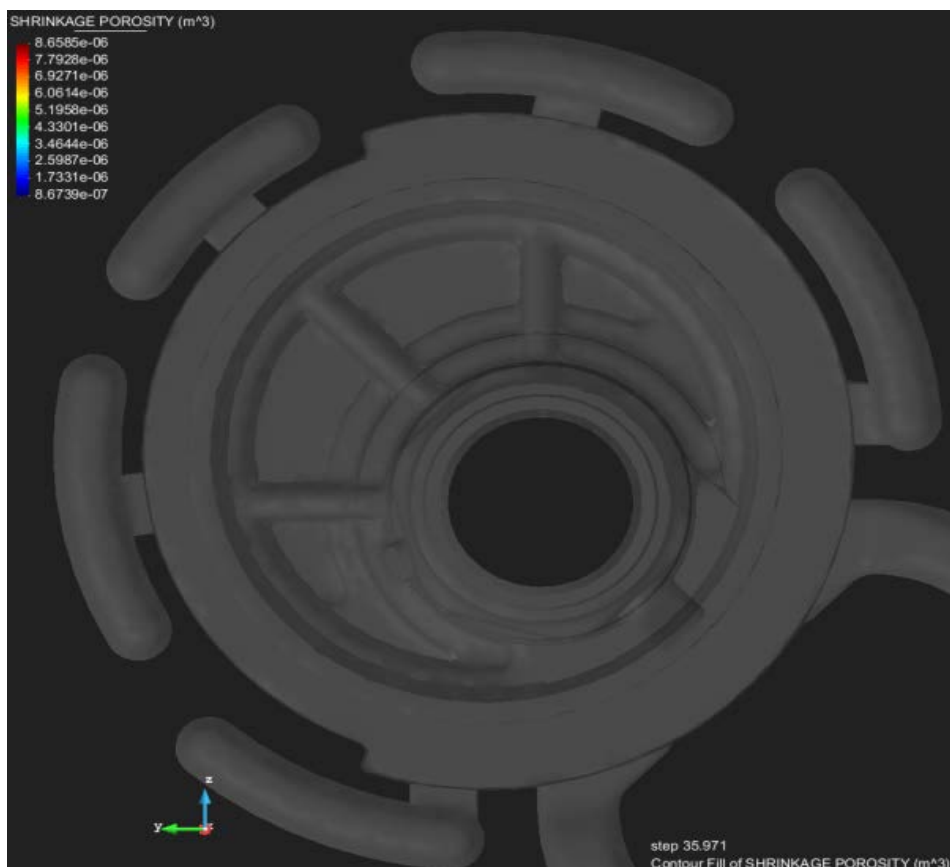
Velocidade de primeira fase= 50%; Velocidade de segunda fase= 5%



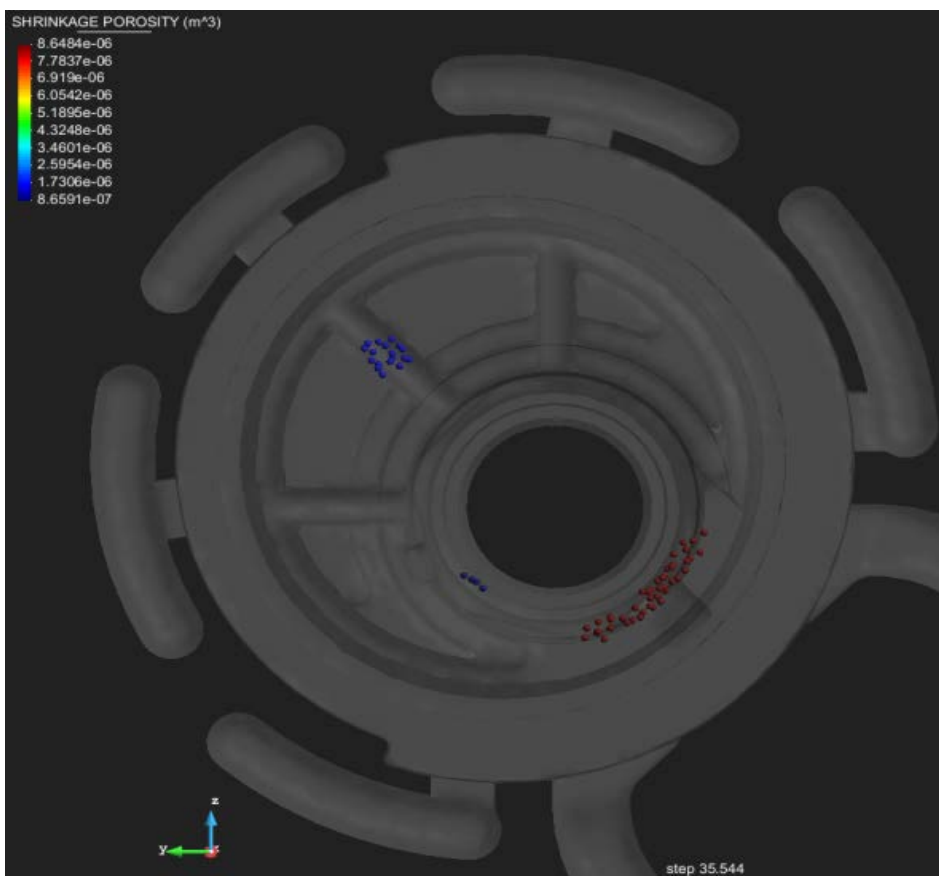
Velocidade de primeira fase= 50%; Velocidade de segunda fase= 50%



Velocidade de primeira fase= 50%; Velocidade de segunda fase= 100%



Velocidade de primeira fase= 100%; Velocidade de segunda fase= 5%



Velocidade de primeira fase= 100%; Velocidade de segunda fase= 50%



Velocidade de primeira fase= 100%; Velocidade de segunda fase= 100%